



Methodischer Leitfaden zur Brandursachenermittlung

Technischer Bericht der vfdb

Steinbach · Puchner · Redmer · van Bebber · Krönke · Fiedler



Herausgegeben vom Referat 2 „Brand- und Explosionsursachen“
des Technisch-Wissenschaftlichen Beirates (TWB) der Vereinigung zur
Förderung des Deutschen Brandschutzes e.V. (vfdb), im Auftrag der vfdb

2. Auflage, März 2013

Methodischer Leitfaden zur Brandursachenermittlung

Technischer Bericht der vfdb

von

Klaus Steinbach

Ulrich Puchner

Thomas Redmer

Peter van Bebber

Klaus Krönke

Heinz Fiedler



Herausgegeben vom Referat 2 „Brand- und Explosionsursachen“
des Technisch-Wissenschaftlichen Beirates (TWB) der Vereinigung zur
Förderung des Deutschen Brandschutzes e.V. (vfdb), im Auftrag der vfdb

2. Auflage, März, 2013



Methodischer Leitfaden zur Brandursachenermittlung

Technischer Bericht vfdb 02-01

Herausgeber: Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes e. V. (vfdb),
Technisch-Wissenschaftlicher Beirat (TWB), Referat 2

Seiten: 578

Verlag, Herausgeber und Autoren haben mit größter Sorgfalt die Texte, Abbildungen und Tabellen erarbeitet. Dennoch können Fehler nicht völlig ausgeschlossen werden. Die vfdb sowie die VdS Schadenverhütung GmbH übernehmen deshalb weder eine juristische Verantwortung noch irgendeine Garantie für die Informationen und Abbildungen weder ausdrücklich noch unausgesprochen in Bezug auf die Qualität, Durchführung oder Verwendbarkeit für einen bestimmten Zweck.

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Gesetzes über Urheberrecht und verwandte Schutzrechte ist ohne Zustimmung der vfdb und des VdS-Verlages unzulässig. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Für die Inhalte der einzelnen Kapitel des Buches haften die jeweiligen Autoren. Dies betrifft auch die Fragen des Urheberrechtes für die übernommenen Quellen (wie Texte, Formeln, Bilder und Darstellungen sowie Tabellen und Stoffdaten) und deren Inhalte.

Die Verweise auf Internetadressen und -dateien beziehen sich auf deren Zustand und Inhalt zum Zeitpunkt der Drucklegung des vorliegenden Druckstücks. Der Verlag übernimmt keinerlei Gewähr und Haftung für deren Aktualität oder Inhalt noch für den Inhalt von mit ihnen verlinkten weiteren Internetseiten.

© VdS Schadenverhütung GmbH, Verlag, Amsterdamer Str. 174, 50735 Köln
verlag@vds.de • www.vds.de

2. Auflage, März, 2013

Bestell-Nr.: VdS 2847-16

ISBN: 978-3-936050-15-8

Vorbemerkung

Die Ermittlung von Brandursachen gehört wegen deren Vielfalt zu den schwierigsten Aufgaben der Feststellung von Schadensursachen. Das hängt aber nicht nur von der absoluten Vielfalt sondern auch von der Bandbreite der möglichen Ursachen in einem einzigen Brandobjekt ab. Zudem zerstört der Brand mit zunehmender Branddauer die für die Ursachenerforschung erforderlichen Spuren oder modifiziert sie so, dass deren Beurteilung erschwert wird. Nicht selten werden sogar die Träger der Spuren und somit natürlich auch die Spuren selbst restlos vernichtet. Diese Problematik ist in der Kriminaltechnik und Schadensforschung singulär.

Deshalb ist eine systematische Suche nach Spuren zwingend erforderlich. Doch gilt es dabei zu beachten, dass jeder Eingriff in das brandveränderte und labile System der Spurenläger und Spuren zu irreversiblen Veränderungen führt und daher eine Extrapolation auf den Zustand vor dem Eingriff erfordert. Jeder voreilige Eingriff in das System kann Spuren unwiederbringlich ändern oder gar zerstören.

Gemäß der Zielstellung, eine vollständige Aufklärung der Brandursache zu erreichen, werden die strafrechtlichen Interessen des Staates gewahrt. Aber auch um die Ansprüche von Geschädigten auf Schadenersatz nach dem Bürgerlichen Gesetzbuch zu befriedigen, muss die Ursache eines Brandes durch Sachbeweis eindeutig festgestellt werden.

Vor diesem Hintergrund schien es notwendig einen Methodischen Leitfaden herauszugeben, in dem die Grundlagen des planmäßigen und folgerichtigen Vorgehens am Brandort beschrieben werden. Der Leitfaden ist als Nachschlagewerk, als Ratgeber und Handbuch konzipiert. Er ist nach thematischen Gesichtspunkten gegliedert. Literaturverweise dienen der Vertiefung der einzelnen Themen.

Zielgruppe des Leitfadens sind alle mit der beweissicheren Feststellung der unterschiedlichsten Brandursachen Befassten. Dies sind die Ermittlungsbehörden (Polizei, Staatsanwaltschaften), die Straf- und Zivilgerichte, Sachverständige der Behörden und der Versicherungswirtschaft und die Angehörigen der gesamten Rechtspflege.

Den Ausgangspunkt für die Erarbeitung des vorliegenden Methodischen Leitfadens zur Ermittlung von Brandursachen bildete die Schaffung einer Handlungsanleitung für die Praxis „Tatortarbeit nach Bränden“ durch eine Bund-Länder-Kommission der deutschen Kriminaltechniken. Die Herausgabe erfolgte im Jahre 1997 unter Mitwirkung einiger der hier tätigen Autoren, allerdings nur für den internen polizeilichen Gebrauch. Dabei wurde erstmals in strukturierter und knapper Form über Aufgaben und Vorgehensweisen am Brandort sowie wichtige Brandursachen informiert. Da diese Handlungsanleitung nur einen begrenzten Überblick für den polizeilichen Dienstgebrauch vermitteln konnte, wurde von den Autoren der Gedanke entwickelt, einen Methodischen Leitfadens zu erarbeiten, in dem neben naturwissenschaftlich-technischen Grundlagen alle wesentlichen Sachverhalte für eine fundierte Ermittlung von Brandursachen sowie zwingend notwendiger Rahmenbedingungen beschrieben werden.

Der Leitfaden wurde von sechs Fachleuten, die alle Mitglieder der vfdB sind, im Rahmen einer zeitweiligen Arbeitsgruppe unter Leitung des Referates 2 des TWB der vfdB konzipiert und erarbeitet. Die Autoren waren oder sind über Jahrzehnte mit der Feststellung von Brandursachen und deren gerichtlicher Verwertung befasst.

Die Erarbeitung der einzelnen Kapitel erfolgte eigenverantwortlich durch die im Impressum aufgeführten Autoren. Der gesamte Leitfaden wurde innerhalb der Arbeitsgruppe hinsichtlich aller Fachinhalte und Schnittstellen im Konsens abgestimmt.

Der Entwurf des Leitfadens wurde dem TWB und dem Präsidium der vfdb vorgestellt, das eine Herausgabe des Leitfadens durch die vfdb befürwortete. Der Entwurf wurde durch ausgewählte Mitglieder des TWB einer fachlichen Sichtung unterzogen. Deren inhaltlichen und redaktionellen Hinweise wurden in den Leitfaden eingearbeitet.

Insofern gilt der Dank der Autoren sowohl dem Präsidium der vfdb als auch dem TWB der vfdb für die gegebene fachliche Unterstützung und die Beförderung des Projektes. Der Dank für jegliche Unterstützung gilt aber auch den Dienststellen der Autoren, in denen sie tätig waren bzw. sind.

Alle Nutzer des Leitfadens werden gebeten, ihre Kommentare zur Anwendbarkeit, zu Mängeln und offenen Fragen per E-Mail an den Vorsitzenden des Referates 2 des TWB der vfdb zu richten.

Herausgeber und Autoren

Herausgeber

Referat 2 „Brand- und Explosionsursachen“ des Technisch-Wissenschaftlichen Beirates (TWB) der Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes (vfdb) e.V. im Auftrag der vfdb Internet: www.vfdb.de

Autoren und deren Verantwortungsbereiche

Kapitel 1, Rechenbeispiele, Tabellenanhang, Glossar, Gesamtreaktion und Gesamtleitung

Dipl.-Chem., Brandoberrat a. D. Klaus Steinbach
Im Heidefeld 21, 39175 Wahlitz
ehemals Themenleiter am Institut der Feuerwehr Sachsen-Anhalt
Vorsitzender des Referates 2 des TWB der vfdb

Kapitel 2, Glossar

Ing. für Brandschutz, Kriminalhauptkommissar Thomas Redmer
LKA des Freistaates Sachsen
PSF 230122 / 230126
01111 Dresden

Kapitel 3, 4, 8, Glossar, Gesamtreaktion

Dipl.-Phys. Dr. rer. nat. Ulrich Puchner, Baudirektor a. D.
ehemals Sachgebietsleiter und stellv. Leiter des Kriminaltechnischen
Instituts des Bayerischen LKA
Mariengassl 4
82234 Weßling

Abschnitt 4.7, Glossar

Dipl.-Chem. Dr. rer. nat. Klaus Krönke, Wiss. Direktor a. D.
ehemals Sachgebietsleiter und Leiter der Naturwissenschaftlichen
Kriminaltechnik des LKA Schleswig-Holstein
Krummbogen 59
24113 Kiel

Kapitel 5, Glossar

Dipl.-Chem. Dr. rer. nat. Peter van Bebber Wiss. Direktor a. D.
ehemals Fachbereichsleiter am BKA – Kriminaltechnisches Institut
Kettelerstraße 33
65193 Wiesbaden

Kapitel 6 und 7, Glossar

Dipl.-Ing. Heinz Fiedler
Sachgebietsleiter am LKA Sachsen-Anhalt
Thüringer Straße 6
39576 Stendal

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	7
1 Die Phänomene Zündung und Verbrennung	9
1.1 Zündung und Verbrennung – Vorgang und Voraussetzungen.....	9
1.2 Brennbarer Stoff	19
1.3 Verbrennungsprozess	21
1.3.1 Brandarten	21
1.3.2 Glutbrand	33
1.3.3 Sonderformen eines Brandes	34
1.3.4 Brandentwicklung – Phasen eines Brandes	35
1.3.5 Brandrückstände.....	38
1.4 Zündbereitschaft, Brennbarkeit und Brandverhalten der Stoffe	38
1.4.1 Zündbereitschaft brennbarer Stoffe	38
1.4.2 Kennzahlen der Zündbereitschaft.....	50
1.4.3 Brennbarkeit von Stoffen	68
1.4.4 Kennzahlen der Brennbarkeit	70
1.4.5 Brandverhalten brennbarer Stoffe	71
1.4.6 Erscheinungsformen.....	73
1.5 Kenngrößen zur Charakterisierung des Brandverlaufes	83
1.5.1 Heizwert.....	83
1.5.2 Flammentemperatur	84
1.5.3 Temperaturen bei einem Brand in einem Raum.....	88
1.5.4 Abbrandgeschwindigkeit.....	90
1.5.5 Wärmestrom des Brandes	98
1.5.6 Wärmestromdichte des Brandes	99
1.5.7 Brandausbreitungsgeschwindigkeit	100
1.5.8 Brandrauch	105
1.5.9 Gefahren durch Brandrauch	112
1.5.10 Kennzahlen zur Beurteilung der Wirkung von Brandrauch	117

1.6 Brände in Räumen	120
1.6.1 Einfluss der Lüftungsverhältnisse bei Bränden in Räumen.....	121
1.6.2 Brände in Räumen ohne Raumöffnungen.....	122
1.6.3 Brände in Räumen mit Raumöffnungen.....	124
1.6.4 Einfluss des Öffnungsverhältnisses auf den Brandverlauf.....	127
1.7 Besondere Raumbrandszenarien.....	130
1.7.1 Flashover	131
1.7.2 Backdraft.....	136
Literatur	137
2 Maßnahmen am Brandort.....	143
2.1 Vorbereitende Maßnahmen.....	143
2.2 Sofortmaßnahmen.....	143
2.3 Erfassung örtlicher, zeitlicher und personeller Zusammenhänge	146
2.3.1 Brandentdeckung, Brandmeldung	146
2.3.2 Alarmierung, Brandbekämpfung, Brandverlauf	147
2.3.3 Zeugenangaben.....	149
2.3.4 Angaben von Geschädigten	150
2.4 Besichtigung des Brandobjektes und Dokumentation der Spuren.....	151
2.4.1 Brandobjekt.....	151
2.4.2 Brandraum	152
2.4.3 Dokumentation des Brandortes	153
2.5 Erfassung technischer Prozesse und sicherheitstechnischer Aspekte ...	157
2.5.1 Zustände, Abläufe, Nutzungsweisen, Unregelmäßigkeiten	157
2.5.2 Brandsicherheits- und Alarmierungseinrichtungen.....	159
2.5.3 Baulicher Brandschutz sowie die Wirksamkeit beeinflussende Zustände und Ausstattungen.....	160
2.6 Spuren	164
2.6.1 Grundprinzipien der Suche und Sicherung von Spuren.....	164
2.6.2 Brandspezifische und nicht brandspezifische Spuren.....	167
2.6.3 Spurensuche mit dem Photoionisationsdetektor – PID	184

2.6.4	Brandmittelspürhunde.....	185
2.6.5	Probenentnahme, Spurensicherung.....	187
2.6.6	Brandspuren an lebenden Personen.....	190
2.6.7	Brandspuren an Leichen.....	191
2.6.8	Experteninformationen.....	192
2.7	Eigensicherung/Arbeitsschutz	193
2.7.1	Arbeitsschutz	193
2.7.2	Gefahren an der Brandstelle.....	203
Literatur	208
3	Ermittlung von Brandursachen.....	209
3.1	Eliminationsverfahren	212
3.2	Direkter Beweis	216
3.3	Sachkundige Feststellung der Brandursache.....	216
4	Brandursachen	219
4.1	Zündung durch natürliche Prozesse.....	220
4.1.1	Sonneneinwirkung	220
4.1.2	Klima- und Umgebungsbedingte Einflüsse.....	226
4.1.3	Blitzschlag.....	238
4.1.4	Wald- und Graslandbrand.....	249
4.1.5	Erdbewegungen.....	252
4.1.6	Tiere.....	252
4.1.7	Meteoriten	254
4.2	Zündung durch chemische Prozesse	255
4.2.1	chemische Reaktionen	255
4.2.2	Offene Flammen, Offenes Feuer, Offenes Licht.....	268
4.2.3	Glut	271

4.3 Zündung durch physikalische Prozesse.....	273
4.3.1 Reibung, Druck	273
4.3.2 Stoffliche Funken	275
4.3.3 Feuerstätten.....	279
4.3.4 Heiße und glühende Flächen und Gegenstände.....	282
4.3.5 Statische Elektrizität	291
4.3.6 Dynamische Elektrizität	294
4.3.7 Brandursachen in Fahrzeugen	340
4.3.8 Spezielle technische Brandursachen	353
4.4 Selbsterwärmungen und Selbstentzündungen	357
4.4.1 Selbstentzündung von biologischen Stoffen	357
4.4.2 Physikalische Selbstentzündung	361
4.4.3 Pyrophore Stoffe.....	363
4.4.4 Selbstentzündung des menschlichen Körpers (SHC)	367
4.5 Brandstiftung	367
4.5.1 Fahrlässige Brandstiftung.....	370
4.5.2 Vorsätzliche Brandstiftung.....	371
4.5.3 Unkonventionelle Spreng- und Brandvorrichtungen (USBV) ...	375
4.5.4 Verbrennung des Menschen	376
4.6 Bauliche Mängel.....	377
4.7 Explosion	378
4.7.1 Einführung	378
4.7.2 Begriffe und Definitionen	378
4.7.3 Explosionstypen.....	379
4.7.4 Wirkungen von Explosionen	397
4.7.5 Methodik der Explosionsursachenerforschung	400
4.7.6 Literatur zu Explosion	402
Literatur	404

5 Analytische Untersuchungen.....	407
5.1 Allgemeines	407
5.2 Untersuchungsmaterial.....	407
5.3 Analytische Verfahren bei der Branduntersuchung.....	408
5.3.1 Chromatographische Verfahren	409
5.3.2 Weitere chromatographische Verfahren.....	439
5.3.3 Spektroskopische Methoden	443
5.3.4 Thermische Analyse	448
Literatur	459
6 Experimentelle Beweisführung und Modellierung.....	461
6.1 Brandversuche	461
6.2 Rekonstruktion.....	464
6.3 Modellierung von Prozessen und Abläufen.....	465
Literatur	467
7 Gutachten zu Brandursachen	469
Literatur	473
8 Qualitätssicherung und -management.....	475
8.1 Der Sachverständige und seine Pflichten	475
8.1.1 Rechtliche Stellung	475
8.1.2 Aufgaben des Sachverständigen.....	476
8.1.3 Sachverständigengutachten	477
8.1.4 Fachliteratur, Urteile	479
8.1.5 Bestellung der Sachverständigen	480
8.2 Qualitätsanforderungen an Sachverständigenbüros und Labors.....	481
8.3 Qualitätspolitik und Instrumente des QM	483
8.4 Akkreditierungsverfahren.....	485
8.5 Neue Akkreditierungsmaßnahmen ab 01.01.2010 und DIN EN ISO/IEC 17020	486

Literatur	489
Glossar	491
Berechnungsbeispiele	503
Tabellenanhang	519
Literatur (Tabellen).....	568

Vorwort

Feuer strahlt große Faszination aus, es hat eine schöne, beinahe ästhetische Erscheinung. Dieser Eindruck wird vielleicht dadurch hervorgerufen, weil die Beherrschung dieses Phänomens eng mit der Menschwerdung verbunden war. Feuer hat aber auch, quasi als Rückseite der Medaille, ein zerstörerisches Potenzial und wird deshalb in bestimmten Situationen als Bedrohung empfunden. In dieser Erscheinungsform, den Bränden, sind Schadensbewertung sowie die Frage nach den Entstehungsursachen sowohl für den technischen Fortschritt als auch das gesellschaftliche Wohlbefinden bis hin zu juristischen Konsequenzen von Bedeutung. In Form der Brandursachenermittlung verbirgt sich hier eine polizeiliche Aufgabe, die das Auftreten von Brandsachverständigen auch in Gerichtsverfahren einschließt. Dabei dient sie der Wahrheitsfindung und letztlich auch zur Feststellung einer persönlichen Schuld.

Die Ermittlung von Brandursachen ist eine echte Herausforderung. Zum einen sind Hinweise und Spuren durch den destruktiven Charakter des Ereignisses selbst häufig gering bzw. verdeckt und folglich nur schwer aufzufinden. Zum anderen erfordern diese Untersuchungen im erheblichen Umfang ein interdisziplinäres Verständnis, für das Spezialkenntnisse und Techniken aus sehr unterschiedlichen Wissensgebieten benötigt werden. Eine Analyse unter dem Blickwinkel der Brandursachenermittlung ist deshalb, insbesondere auch für den Neueinsteiger, sehr hilfreich. Und gerade bei einer solchen zusammenfassenden Darstellung wurden in der Vergangenheit Defizite im deutschsprachigen Raum erkannt.

Eine analoge Situation ist als Folge dezentraler Strukturen aber auch bei verschiedenen anderen Problemen aus dem großen Gebiet des Brandschutzes zu beobachten. So hat sich die „Vereinigung zur Förderung des deutschen Brandschutzes e. V.“ (vfdb) seit vielen Jahrzehnten bemüht, Handlungsunterstützung in solchen Fragen zu geben. Dazu werden Experten zusammengeführt, die in Fachreferaten derartige Probleme diskutieren, schriftliche Darlegungen in Form von Richtlinien, Merkblättern, Reports und anderen Dokumenten erstellen und diese über den „Technisch-Wissenschaftlichen Beirat“ (TWB) der vfdb in der Fachöffentlichkeit beraten. Schließlich bilden diese Dokumente nach einem Beschluss der vfdb eine Empfehlung für einen Handlungsrahmen in den entsprechenden Situationen.

In der Regel wird über den TWB auch der generelle Bedarf an gewissen Regelungen bzw. Hilfen artikuliert, und es werden gegebenenfalls die notwendigen Schritte für die Bearbeitung eines solchen Problems eingeleitet. Es ist mir deshalb eine besondere Freude, den vorliegenden Leitfaden zur Brandursachenermittlung zu empfehlen. Schließlich habe ich über eine Dekade als Vorsitzender des TWB auch die Entstehung dieses Dokumentes aktiv begleitet.

Im vfdb-Referat 2 „Brand- und Explosionsursachen“ (BEU) sind Fachleute versammelt, die sich neben ihrer wissenschaftlichen, fachspezifischen Reputation auch durch langjährige Praxis als Brandursachenermittler und Brandsachverständige auszeichnen. Schon dies allein hat garantiert, dass diese Spezialisten als Autoren mit dem vorliegenden Leitfadens erfolgreich eine Lücke schließen konnten. Der Leitfaden ermöglicht es gleichermaßen, das Vorgehen in der Praxis zu vereinheitlichen und damit das Verständ-

nis untereinander zu verbessern, wie auch Hilfe und Unterstützung bei der Einarbeitung in dieses Aufgabengebiet zu geben. Dazu dienen nicht zuletzt die Zusammenstellungen wichtiger Formeln und Daten, um konkrete Aussagen zu derartigen Sachverhalten im Einzelfall treffen zu können. Aber auch vorgeschlagene Handlungsabläufe und Checklisten mit wichtigen Arbeitsschritten bis hin zu den anwendbaren Untersuchungstechniken (experimentell und rechnerisch über Computer-Simulationen) sowie der Versuch einer einheitlichen Begriffsbildung durch Definition und Erklärung der wichtigsten Phänomene sind wertvolle Hilfen.

Es sei aber nicht verheimlicht, dass ein solcher Leitfaden, der schon fast Lehrbuchcharakter trägt, nie ganz fertig ist. Vielmehr wird er zur noch breiteren Diskussion unter den Fachleuten anregen, wofür die vfdb einen geeigneten Rahmen bietet. Die Schwierigkeiten eines solchen Leitfadens haben sich schon in der Erarbeitungsphase gezeigt, musste man den Zeithorizont doch immer wieder hinausschieben und nach Diskussion unter den Autoren den Standpunkt gelegentlich neu bestimmen. Umso lobenswerter ist es, dass nunmehr ein nützliches Ergebnis vorliegt, dem ich gern meine besten Wünsche mit auf den Weg gebe.

Zugleich möchte ich den Autoren für ihr mehrjähriges ehrenamtliches Engagement danken. Wie schwierig die Brandursachenermittlung sein kann, habe ich vor Jahren selbst erfahren, als ich an der Analyse von Schmelzperlen im Hinblick auf primäre und sekundäre Kurzschlüsse mit Hilfe der sehr aufwändigen AUGER-Spektroskopie beteiligt war. Umso hochachtungsvoller bewerte ich nun die Tatsache, dass mit dem Leitfaden ein Werk vorliegt, das sich den vielen Detailfragen, wie Anforderungsprofilen und Rechtsgrundlagen, charakteristischen Phänomenen, modernen Untersuchungsmethoden (z. B. Gaschromatographie/Massenspektroskopie GCMS, Infrarot-Thermografie, CFD-Computersimulationen) sowie speziellen Einsatzszenarien zuwendet.

Ich bin überzeugt, dass dieser Leitfaden seinen dankbaren Leserkreis und damit seine Anerkennung finden wird. Ich hoffe, dass damit auch eine intensive Diskussion zur Brandursachenermittlung angestoßen wird, was auch für die Weiterentwicklung des Leitfadens förderlich sein wird.

Magdeburg, Oktober 2011

Prof. Dr. Reinhard Grabski

Präsidiumsmitglied und stellvertretender Vorsitzender des Beirates (TWB)
Vereinigung zur Förderung des deutschen Brandschutzes e. V. (vfdb)

Direktor a. D.
Institut der Feuerwehr Sachsen-Anhalt

1 Die Phänomene Zündung und Verbrennung

1.1 Zündung und Verbrennung – Vorgang und Voraussetzungen

Unter Zündung wird der Vorgang verstanden, der die Verbrennung einleitet. Eine Zündung ist erfolgt, wenn es in einem offenen System zur Ausbildung einer Flamme kommt oder wenn in einem (geschlossenen) System eine Verpuffung oder Explosion eintritt. Wichtigste Voraussetzungen für eine Zündung sind das Vorhandensein eines brennbaren Systems und einer Zündquelle. Zwar findet die Zündung vor allem in der Gasphase (Gas-Luft- bzw. Dampf-Luft-Gemische) statt, doch sind im umfassenden Sinne auch Zündungen von Festphasengemischen und Flüssigphasengemischen möglich. Vereinfacht ausgedrückt kann gesagt werden: Die Zündung ist der Startvorgang für die Entstehung einer sichtbaren Verbrennung (das Freiwerden von Rauchgasen, das Auftreten von Glutbränden oder offenen Flammen). Als Voraussetzung ist eine Zufuhr von Energie notwendig, wobei diese dem brennbaren System entweder von außen zugeführt wird oder diese Energie durch im Innern ablaufende Prozesse erzeugt wird. Eine Unterscheidung in Fremdzündung und Selbstentzündung erfolgt über die Charakterisierung der Zündbedingungen.

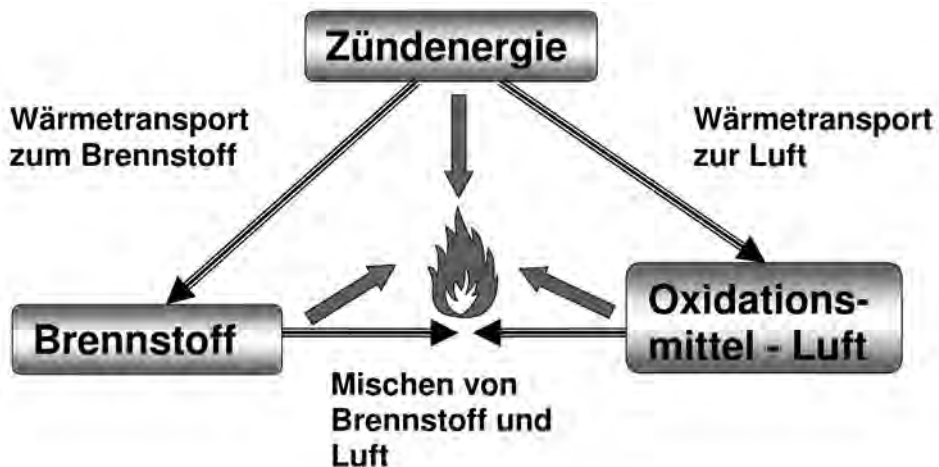


Abb. 1: Randbedingungen für eine Zündung – schematisch

Die Freisetzung von Gasen und Dämpfen, die für eine Zündung in der Gas- oder Dampfphase notwendig sind, erfolgt infolge **Verdampfung** oder **Verdunstung** (siehe auch Pkt.1.4) sowie vor allem bei Feststoffen durch Pyrolyse.

Beim thermischen Abbau, dessen wichtigster Prozessschritt die Pyrolyse ist, laufen bei organischen Substanzen in Abhängigkeit von der Zersetzungstemperatur charakteristische Reaktionsschritte ab, die in der nachfolgenden Tabelle zusammengefasst sind.

Tab.1: Grundlegende Stufen eines thermischen Abbaus (Pyrolyse) von organischen Stoffen

Temperatur	Zersetzungsreaktion/Zersetzungsprodukte
ca. 100 °C	dampfförmige H ₂ O-Freisetzung infolge Trocknung
ca. 200 bis 300 °C	Abspaltung von H ₂ O und CO ₂ als Folge einer Dehydratisierung bzw. Decarboxylierung
ca. 350 °C	Beginn der Kettenspaltung bei Kohlenwasserstoffen – Abspaltung endständiger Kohlenwasserstoffreste wie CH ₄
ca. 500 °C	Kettenspaltung in Form des Aufbrechens der Molekülketten (Kracken) – Abspaltung niederer Kohlenwasserstoffe
über 600 °C	Kettenspaltung in Form des Aufbrechens der Molekülketten (Kracken) – Freisetzung von Olefinen, einfacher und höherer Aromaten

Unter Pyrolyse, dem wesentlichsten Schritt für die Freisetzung von brennbaren Gasen und Dämpfen, wird die Zersetzung von festen oder flüssigen Stoffen bei hohen Temperaturen (400–700 °C) meist unter Sauerstoffausschluss verstanden. Bei dieser (thermischen) Spaltung chemischer Verbindungen wird durch hohe Temperaturen ein Bruch der chemischen Bindungen innerhalb der oftmals großen Moleküle erzwungen. Bedingt durch die Abwesenheit bzw. eine sehr geringe Konzentration von Sauerstoff kommt es nicht zur unmittelbaren Verbrennung der Pyrolyseprodukte.

Beim Einwirken einer Zündquelle auf den brennbaren Stoff erfolgt die Zündung, wenn der Energiegehalt, die Art der Zündquelle (siehe auch Zündbereitschaft oder Entzündlichkeit) und die Dauer ihrer Einwirkung hinreichend sind. Die Einwirkung einer externen Zündquelle wird als Fremdzündung bezeichnet. Als weitere Randbedingungen sind die Konzentration von Oxidationsmittel und brennbarem Stoff (Gase, Dämpfe, Pyrolysegase) von Bedeutung.

Vollzieht sich die Zündung durch Wärme produzierende Prozesse innerhalb des brennbaren Systems, wird dies als Selbstentzündung bezeichnet. Eine Besonderheit stellt die thermische Selbstentzündung dar, weil diese eintritt, wenn der Stoff in Abwesenheit von Sauerstoff so hoch erwärmt ist, dass bei plötzlichem Zutritt von Sauerstoff eine spontane Zündung eintritt. Der im weiteren benutzte Terminus Zündbereitschaft beschreibt neben dem Begriff Brennbarkeit (der Fähigkeit zur selbständigen Aufrechterhaltung der stabilen Verbrennung nach Zündquellenentfernung) die Eigenschaften von brennbaren Systemen, aus der sich eine Beurteilung der Brandgefährdung als Kriterium für die potentiellen Voraussetzungen zur Entstehung eines Brandes ableiten lässt. Die Charakterisierung des eigentlichen Verbrennungsprozesses erfolgt mittels des Kriteriums Brandverhalten. Die Brandgefährlichkeit brennbarer Stoffe ist in diesem Zusammenhang als eine übergeordnete Begriffsebene anzusehen. Die Brandgefährlichkeit von Stoffen wird durch die nachfolgend in der Tabelle dargestellten Eigenschaften beschrieben.

Tab. 2: Überblick über die Parameter zur Beschreibung der Brandgefährlichkeit

Brennbarkeit	Zündbereitschaft	Brandverhalten
Sauerstoffindex	Flammpunkt	Flammentemperatur
Temperaturindex	Explosionspunkte	Abbrandgeschwindigkeit
Brennbarkeitspotential	Zündgrenzen	Flammenausbreitungsgeschwindigkeit
	Selbsterwärmungstemperatur	Wärmestromdichte
	Selbstentzündungstemperatur	
	Mindestzündenergie	

Unter dem Begriff **Zündbereitschaft**, auch **Entzündlichkeit** oder Entzündbarkeit, wird im allgemeinen der Zustand eines Stoffes in Bezug auf die Möglichkeit seiner Zündung durch eine fremde Zündquelle verstanden. Die Annahme, dass Stoffe bzw. Stoffgemische, mehr oder weniger leicht entzündet werden können, stellt vor allem auf den Sachverhalt Fremdzündung ab. Die Zündbereitschaft umfasst auch den Sachverhalt Selbstentzündung.

Neben der Feststellung, dass allgemein die Selbstentzündungstemperatur niedriger liegt als die Zündtemperatur, hängen beide Vorgänge in entscheidendem Maße von komplexen äußeren Bedingungen wie

- chemische und physikalische Eigenschaften des Stoffes
- Kinetik der Reaktion
- Masse und Geometrie des Stoffes
- thermodynamische Bedingungen, denen das brennbare System unterliegt
- von außen zugeführte Energie

ab, wobei im Einzelnen folgende wichtige Randbedingungen wie Stoffvolumen, Form und Größe des Reaktionsbehälters, Material des Reaktionsbehälters, Stoffmenge, Zerteilungstemperatur, Packungsdichte, Feuchtigkeitsgehalt, Luftaustauschverhältnisse, Aufheizgeschwindigkeit, Wärmeaustauschverhältnisse, Konzentration des Oxydationsmittels, Konzentration des reaktionsfähigen Stoffs u. a. zu nennen wären.

Da die Zündung das Vorhandensein eines brennbaren Systems voraussetzt, sollten alle Betrachtungen zur Beurteilung der Zündbereitschaft auch auf das vorhandene brennbare System ausgerichtet sein, wenngleich für die Bewertung der Zündbereitschaft der Energiegehalt und die Wirkdauer der Zündquelle (ausgedrückt durch die **Wärmestromdichte** der Zündquelle) ebenso wichtige Parameter sind. Hieraus resultiert, dass das Maß für die Zündbereitschaft im Wesentlichen eine Funktion des Betrages eines notwendigerweise wirkenden thermischen Impulses ist. Daraus ergibt sich als Schlussfolgerung,

dass die in einem stofflichen System vorhandene Energie durch physikalische und/oder chemische Prozesse in weiten Grenzen beeinflusst werden kann. Somit ist leicht zu verstehen, dass z. B. feste Stoffe in der Regel entweder durch eine externe Wärmezufuhr in die Gasphase überführt werden müssen, um die Voraussetzungen für eine Zündung zu erreichen. Andererseits können feste Stoffe, wenn diese stark zerkleinert werden, also als staub- oder pulverförmige Produkte vorliegen, durch weniger intensive Zündquellen zur Entzündung gebracht werden. Wie vorgenannt, ist auch die Möglichkeit einzuschließen, dass sich ein stoffliches System ohne das Wirken einer äußeren Zündquelle, d. h. von selbst erwärmen und schließlich entzünden kann. Wesentlich hierbei ist, dass durch einen Reaktionsablauf mit einem exothermen Charakter innerhalb des reagierenden Systems mehr Wärme freigesetzt als an die Umgebung abgegeben wird.

$$q_{\text{Frei}} > q_{\text{Verl.}} \quad (1)$$

$[q_{\text{Frei}}]$ - freigesetzte Wärme in kJ

$[q_{\text{Verl.}}]$ - Wärmeverluste an die Umgebung in kJ

Neben der weit verbreiteten Kenntnis, dass sich feste Stoffe von selbst entzünden können, gilt gleiches auch für Flüssigkeiten, wenn diese in einer reaktionsfähigen Konzentration auf einer großen Oberfläche verteilt vorliegen und durch ablaufende Reaktionen der vorgenannte Grundsatz einer verstärkten Wärmefreisetzung gilt.

Inwieweit der sich anschließende **Verbrennungsprozess** als ein **Brand** zu betrachten ist, wird durch nachfolgende Definition beschrieben. Ein Brand ist ein nicht bestimmungsgemäßes Brennen, das sich unkontrolliert ausbreiten kann. Das **Brennen** selbst ist eine mit **Flamme und/oder Glut** selbständig ablaufende exotherme Reaktion zwischen einem brennbaren Stoff und in der Regel dem Sauerstoff der Luft. Hierbei werden Verbrennungsprodukte frei, die als ein verbrennungstypisches Gemisch in der nachfolgend beschriebenen aber variablen Zusammensetzung auftreten können. Dies können im Einzelnen sein:

- gasförmige Oxide
- andere sich bildende Oxidationsprodukte
- inerte Anteile
- Pyrolyseprodukte
- Feststoffpartikel
- Ruß
- Luftanteile und
- Feuchte

Weiterhin ist mit dem Auftreten von Brandstoffresten und nichtbrennbaren Rückständen in Form von Aschen und Schlacken zu rechnen.

Diese Sachverhalte unterstreichen damit nachhaltig den Charakter eines Schadenfeuers im Sinne eines ungesteuerten Brandes. Im Gegensatz dazu verlaufen die technischen Verbrennungsprozesse vollkommen in Richtung der zu erwartenden Endprodukte sowie vollständig bezogen auf den eingesetzten Brandstoff. Bei Bränden sind somit grundsätzlich **Unvollständigkeit** und **Unvollkommenheit** zu erwarten.

Natürlich reagiert der im Brandstoff chemisch gebundene Sauerstoff im Verbrennungsprozess mit. Auf brennbare Systeme aber, bei denen Oxidationsmittel und Reduktionsmittel als Mischung in **einer** Phase vorliegen, wird nicht explizit eingegangen.

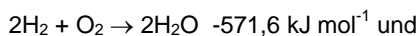
In der Regel liegen die bei einem Brand beteiligten Reaktionspartner räumlich getrennt vor. Die dem Verbrennungsprozess im Sinne einer chemischen Reaktion zugrunde liegende Reaktionsgeschwindigkeit wird durch die Transportvorgänge zur Reaktionszone hin und von ihr weg bestimmt.

Wie schon ausgeführt ist die Verbrennung grundsätzlich als ein chemisch-physikalischer Prozess und vom Charakter der eigentlichen Reaktion als ein Red-Ox-Prozess (komplexer Oxidations- und Reduktionsprozess) zu betrachten. Ein brennbarer Stoff reagiert mit einem Oxidationsmittel, zumeist mit dem Sauerstoff der Luft (die Konzentration beträgt ca. 21 Vol.-%), spontan, d. h., mit hoher Reaktionsgeschwindigkeit unter Freisetzung von Wärme und u. U. mit Lichterscheinungen wie in Form von Flammen und/oder Glut. Das Grundprinzip eines Red-Ox-Prozesses besteht darin, dass das Oxidationsmittel, z. B. Sauerstoff, einen anderen Stoff oxidiert und dabei selbst reduziert wird. Umgekehrt reduziert ein Reduktionsmittel wie der Brennstoff das Oxidationsmittel und wird dabei selbst oxidiert.

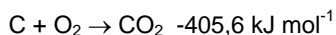
Allgemein bekannte Oxidationsprozesse, wie das Rosten von Eisen, verlaufen sehr langsam. Bedingt durch den langsamen Verlauf dieses Prozesses und einem sich ständig auf sehr kleinem Niveau vollziehenden Energieaustausch mit der Umgebung kommt es zu keiner fühlbaren Temperaturerhöhung. Ebenso wenig können Lichterscheinungen wie in Form von Flammen und/oder Glut beobachtet werden.

Klassische spontane Red-Ox-Reaktionen im Sinne einer Verbrennung sind:

1. die Knallgasreaktion



2. die Kohlenstoffverbrennung



Wie schon bei der Zündung beschrieben, kann der brennbare Stoff in fester, flüssiger oder gasförmiger Form vorliegen. Außer bei Gasen ist in der Regel bei Feststoffen und bei Flüssigkeiten eine thermische Aufbereitung des Brennstoffes notwendig. Dies erfolgt durch eine aus der Zündquelle resultierende Wärmezufuhr. Bei festen Stoffen ist praktisch immer zunächst eine thermische Aufbereitung des Stoffs notwendig (zum eigentlichen Verlauf – siehe Brandarten).

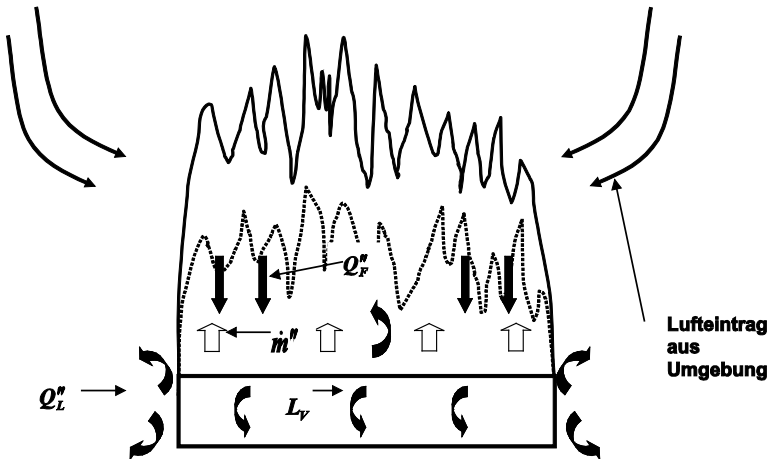


Abb. 2: Übersicht über eine brennende Fläche, wobei \dot{m}'' für die Dichte des Massestroms von der Brandstoffoberfläche, Q_F'' für die Dichte des Wärmestromes aus der Flamme auf die Brandstoffoberfläche, L_V für die aufzuwendende Pyrolysewärme und Q_L'' für die Wärmeverluste an die Umgebung stehen.

Wie hoch der Energieaufwand sein muss, um einen brennbaren Stoff verbrennungsgerecht aufzubereiten, ist wie vorgenannt, von einer Reihe stofflicher Eigenschaften wie auch äußerer Bedingungen abhängig. Hierfür steht nachfolgende Bilanzgleichung für die **spezifische Abbrandgeschwindigkeit** (siehe Pkt. 1.5.4):

$$\dot{m}'' = \left(\frac{Q_F'' - Q_L''}{L_V} \right) \quad (2), \text{ wobei}$$

$[\dot{m}'']$ - die spezifische oder flächenbezogene Abbrandgeschwindigkeit
in $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$

$[Q_F'']$ - Wärmezufuhr aus der Flamme auf die Brandstoffoberfläche in $\text{kJ m}^{-2} \text{s}^{-1}$

$[Q_L'']$ - Wärmeverluste an die Umgebung in $\text{kJ m}^{-2} \text{s}^{-1}$

$[L_V]$ - Verdampfungs- und Pyrolysewärme in J kg^{-1}

Der Vorgang stellt sich als ein Kreisprozess aus Zündung und thermischer Rückwirkung dar, wobei die vorgenannte Energiebilanz in gleicher Weise enthalten ist.

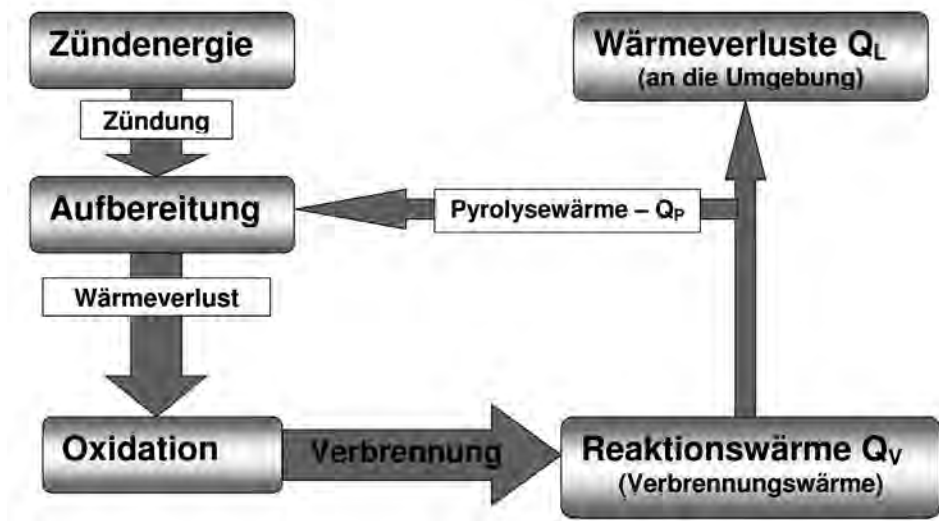


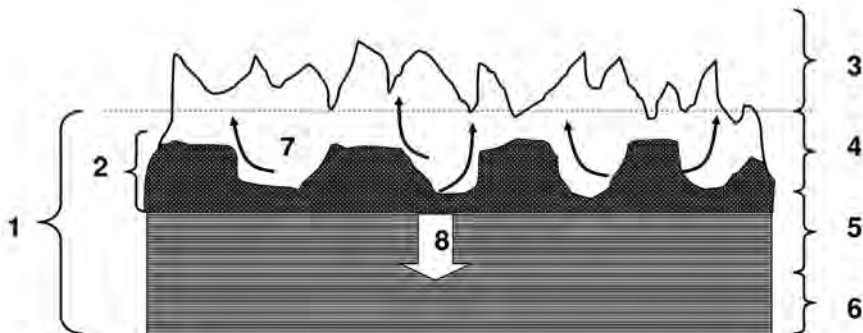
Abb. 3: Darstellung des Prozesses der thermischen Aufbereitung und des Brennens von festen Stoffen

Das Stoffsystem besteht aus dem Brandstoff, dem Luftsauerstoff, den inerten Gasbestandteilen der Luft und anderen Stoffen, die zur sogenannten Umgebung zu rechnen sind. Die Stoffe der Umgebung können durch den Brand dergestalt verändert werden, indem sie selbst Wärme freisetzen oder auch aufnehmen. In der Folge können diese Stoffe zur Brandausbreitung beitragen, d. h. sie werden in den Verbrennungsvorgang einbezogen. Wird Zündenergie zugeführt, so wird also das gesamte stoffliche System aufbereitet. Sind die dabei auftretenden Wärmeverluste begrenzt, kann die Oxydationsreaktion so verlaufen, dass sich ein selbständiges Brennen einstellt. Die dabei freiwerdende Reaktionswärme Q_F wird dann einerseits die Wärmeverluste Q_L kompensieren und andererseits nach Wegfall der primär notwendigen Zündenergie soviel Wärme erzeugen, dass der Kreisprozess erhalten bleibt. Sind die Wärmeverluste Q_L und Q_P (Pyrolyse) zu groß, wird das Feuer verlöschen, weil die verbleibende Reaktionswärme in ihrem Betrag zu klein wird, um die Aufbereitung und Oxydation zu sichern. Der Kreisprozess bleibt also so lange bestehen, als die Grundbedingung (1) erfüllt ist und endet erst mit dem Verbrauch des Brennstoffs. Der Brandverlauf wird maßgeblich durch folgende Vorgänge charakterisiert:

- Vorgänge ohne Stoffveränderungen wie Erwärmen, Schmelzen, Verdampfen und Trocknen
- Vorgänge mit Stoffveränderungen wie Zersetzung und Pyrolyse
- Eintrag der Verbrennungsluft und Oxydation der Brandstoffe
- Austrag der Brandgase und anderer flüchtiger Verbrennungsprodukte

Diese vorgenannten physikalischen und chemischen Vorgänge im Sinne einer Aufbereitung der Brandstoffe stellen insbesondere bei der Verbrennung von Flüssigkeiten und Feststoffen eine wesentliche Voraussetzung für deren Verbrennung dar.

Die grundsätzlichen Zusammenhänge bei der Pyrolyse von Holz zeigt die nachfolgende Abbildung.



- 1 - ursprüngliches Material 2 – aufgespaltene Oberfläche
 3 – Flammenbereich 4 – Bereich der vollkommenen Kohlebildung
 5 – Pyrolysezone 6 – unpyrolysiertes Holz
 7 – austretendes Pyrolysegas 8 – Wärmeübertragung ins Holzinnere

Abb. 4: Brennen einer Holzoberfläche – schematisch

Bei jeder chemischen Reaktion, also auch bei der Verbrennung, entstehen nicht nur neue Stoffe, sondern es kommt zu einem Energieumsatz, d. h., entweder wird bei der Reaktion Energie verbraucht oder erzeugt. Die Verbrennung ist als eine wärmefreisetzende d. h. exotherme chemische Reaktion zu verstehen, bei der die Energiefreisetzung in der Regel in Form von Wärme und Licht erfolgt. Die freiwerdende Wärme in Form der Verbrennungsenthalpie ΔH ergibt sich aus der Differenz der Summe der Standardbildungsenthalpien der Ausgangsprodukte (Edukte) $\sum \Delta H_{\text{Edukte}}$ und der Summe der Standardbildungsenthalpien der Endprodukte (Produkte) $\sum \Delta H_{\text{Produkte}}$.

$$\Delta H_V = \sum \Delta H_{\text{Produkte}} - \sum \Delta H_{\text{Edukte}} \quad (3)$$

Die Endprodukte dieses Prozesses sind gemessen an ihrer Bildungsenergie immer energieärmer als die Ausgangsprodukte und deshalb stabiler.

Eine einfache Übersicht zu den energetischen Vorgängen zeigt Abb. 5

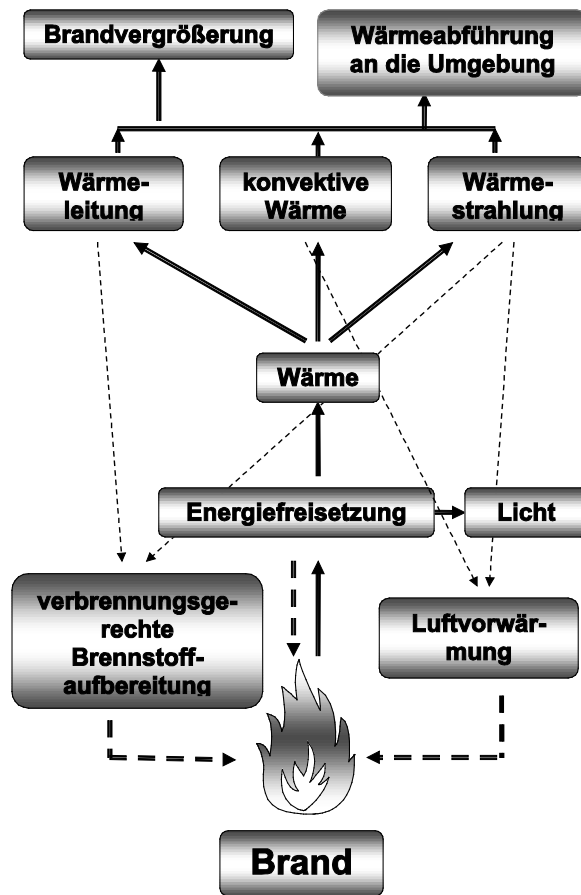


Abb. 5: Energieschema eines Brandes

Der Brandstoff muss, wie schon ausgeführt, durch die Zuführung von Energie – mindestens in einem Teilvolumen – so aufbereitet werden, dass eine Zündung möglich ist. Je nach Art der Energiezuführung, der entsprechenden Wärmestromdichte und den Brandstoffeigenschaften kann dieser der Zündung vorausgehende Vorgang auch eine längere Zeitspanne andauern.

So wird einerseits mit der verbrennungsgerechten Aufbereitung der Brandstoffe ein Teil der beim Brand freiwerdenden Energie verbraucht, während andererseits der größte Teil der freigesetzten Energie in Form von Strahlung und Konvektion an die Umgebung abgegeben wird. Dieser Anteil beträgt z. B. bei einem entwickelten Flammenbrand ca. 90 %. Die Wärmeleitung in Höhe von ca. 10 % spielt für die Erwärmung des Brandstoffs und Wärmewirkung in Richtung Umgebung nur eine untergeordnete Rolle.

Dabei werden mehr als 50 % als Konvektionswärme mit den Brandgasen abgeführt, während der Strahlungsanteil in Form von Wärme- und Lichtstrahlung bezogen auf die

aus der Verbrennungszone abgeführten Energie z. B. beim Brand von Schnittholzstapeln mit teilweise 30 % bis 40 % benannt wird [1.1]. Diese Angaben erscheinen eher sehr hoch, zumal die Wärmeleistung eines Holzfeuers unter Berücksichtigung von Heizwert und Abbrandgeschwindigkeit bei ca. 30 % im Vergleich zu einem Kohlenwasserstoffbrand liegen dürfte. Dem gegenüber wird für ein Ottokraftstoffpoolfeuer mit einem Durchmesser von 20 m eine Gesamtwärmeleistung von 1140 MW angegeben, wobei für die Konvektionswärme ein Anteil von 797 MW, für den Strahlungsanteil der Flamme in Richtung Umgebung von 107 MW und für den Strahlungsanteil in Richtung Flammenspitze und Brennstoffoberfläche von insgesamt 31,4 MW berechnet wurden (d. h. ca. 12 % entfallen auf den Strahlungsanteil). Bei Tankbränden mit kleineren Durchmessern (zwischen 1,0 und 3,0 m) werden bedingt durch den etwas anderen Flammencharakter Strahlungsanteile zwischen 20 und 40 % angegeben [1.2], [1.3], [1.4].



Abb. 6: Arten der Wärmeübertragung

Letztendlich sind vor allem Konvektion und Strahlung für das verbrennungsgerechte Aufbereiten des Brandstoffs in den noch nicht vom Brand erfassten Teilen verantwortlich.

Im Fall des Abbrandes von Flüssigkeiten mit freier Oberfläche erfolgt die Wärmeübertragung auf die Flüssigkeit nahezu ausschließlich durch Rückstrahlung auf die Flüssigkeitsoberfläche.

Bei Feststoffbränden in Gebäuden dagegen werden nur etwa 25 % der Wärmeübertragung auf den Brandstoff durch Strahlung zugeschrieben, während 75 % auf die Konvektion entfallen.

Die Erwärmung von festen und flüssigen Brandstoffen in tieferen Schichten erfolgt fast nur durch Wärmeleitung. Aufgrund der geringen Wärmeleitfähigkeit vollzieht sich die Wärmeausbreitung (Durchwärmung) bei den meisten brennbaren Stoffen, außer bei den Metallen, sehr langsam (siehe auch brennbarer Stoff).

Zwischen der sich während des Brandes vollziehenden Wärmefreisetzung und dem weiteren Brandverlauf bestehen insofern Zusammenhänge, als durch Wärmeübertragung der Auftrieb der Brandgase und damit der Eintrag von Frischluft beeinflusst werden. Dabei gilt es zu beachten, dass diese Frischluft durch die Wärmestrahlung, wenn

auch nur in geringem Maße, direkt erwärmt werden kann. Bedeutsamer ist deren Erwärmung durch das Vorbeiströmen an heißen Oberflächen, die durch Strahlung oder Wärmeleitung erwärmt worden sind.

Auf die Vermischung von Frischluft mit heißen Brandgasen wird unter dem Sachverhalt **lüftungskontrollierter Brand** (siehe Pkt.1.6.1) eingegangen.

Je nach Geschwindigkeit der Oxidationsreaktion erfolgt auch die Wärmefreisetzung unterschiedlich schnell. Die infolge Verbrennung freiwerdende Wärme bezeichnet man als Verbrennungswärme. Unter effektiver Verbrennungswärme versteht man die insgesamt bei der Verbrennung eines Materials freiwerdende Wärme Q . Unter spezifischer Enthalpie wird die bei vollständiger Verbrennung einer bestimmten Masse eines Materials freiwerdende Wärme verstanden – siehe auch bei **Heizwert**. Da aber bei Bränden die Verbrennung unvollkommen und unvollständig verläuft, erreicht die effektive Verbrennungswärme deutlich niedrigere Werte als durch den **unteren Heizwert** – H_U ausgedrückt wird (Weiteres siehe bei Heizwert und Brandintensität).

1.2 Brennbarer Stoff

Brennbare Stoffe sind gas- oder dampfförmige, flüssige oder feste Stoffe, die im Gemisch oder im Kontakt mit Sauerstoff zum Brennen angeregt werden können.

Bei ihrer thermischen Aufbereitung sind die brennbaren Stoffe dann nach erfolgter Vermischung mit einem geeigneten Oxydationsmittel, meist mit dem Sauerstoff der Luft, nach erfolgter Zündung in der Lage zu verbrennen. Die brennbaren Stoffe sind somit ein wesentlicher Bestandteil des brennbaren Systems. Die meisten brennbaren Stoffe bestehen vorwiegend aus chemischen Verbindungen der Elemente Wasserstoff (H) und Kohlenstoff (C).

Die Einteilung der brennbaren Stoffe erfolgt, wie schon in Tabelle 2 zum Ausdruck gebracht, vor allem entsprechend ihrer Brennbarkeit, ihrer Zündbereitschaft (z. B. an Hand der Zündtemperatur, des Flammpunktes) und ihrem Brandverhalten. Weiterhin erfolgen Einteilungen über die Gefahrklasse (Gefahrgutrecht) und die Brandklasse. Eine Übersicht über die möglichen Erscheinungsformen brennbarer Stoffe gibt die nachfolgende Tabelle.

Tab. 3: Erscheinungsformen von Brandstoffen

Aggregatzustand	Erscheinungsform	Eigenschaft	Sonderform – hybrides Gemisch
fest	Feststoff	schmelzend	Hybrides Gemisch ist ein Gemisch von Luft mit brennbaren Stoffen in verschiedenen Aggregatzuständen. Hierbei handelt es sich um Staubaerosol- bzw. Flüssigkeitsaerosol/Luft - Gemische in Verbindung mit brennbaren Gasen bzw. Dämpfen.
		nicht schmelzend	
	Staub	lagernd	
	Staubaerosol*	schwebend	
flüssig	Flüssigkeit	dampfförmig	
	Flüssigkeitsaerosol*	tröpfchenförmig	
gasförmig	Gas	gasförmig	

* Aerosol hier ein Gemisch (Dispersion) aus festen oder flüssigen Schwebeteilchen und Luft.

Eine spezielle Betrachtung der brennbaren Stoffe stellt ihre Einteilung in Brandklassen dar. Unter Brandklassen wird eine Klassifizierung der Brände entsprechend dem beteiligten brennbaren Stoff verstanden. Der Hintergrund für diese Klassifikation besteht vor allem in der richtigen Auswahl des entsprechenden Löschmittels – Einteilung der Brände in Brandklassen gemäß DIN EN 2 insbesondere im Zusammenhang mit der Anwendung von Handfeuerlöschern.

- Brandklasse A
- Brandklasse B
- Brandklasse C
- Brandklasse D
- Brandklasse F

Brandklasse A:

Zur Brandklasse A gehören alle festen Stoffe hauptsächlich organischer Natur, die normalerweise unter Flammen- und Glutbildung verbrennen (z. B. Holz, Stroh, Kohle, Papier, bestimmte Kunststoffe – vor allem Duroplaste, Gummi, Textilien u. a.), wobei die Stoffe in folgenden Erscheinungsformen auftreten können:

- kompakte, großdimensionierte Gegenstände mit einer ausgeprägten räumlichen Struktur
- Flächengebilde wie Textilien, Planen, Folien
- fasrige Stoffe
- fein zerteilte Feststoffe beliebiger Form, Struktur und Dichte unterhalb einer Korngröße von 500 µm wie Stäube, Mehle, Pulver u. a.

Brandklasse B:

Zur Brandklasse B gehören alle flüssigen und flüssig werdenden brennbaren Stoffe wie z. B. Vergaserkraftstoff, Benzol, Petroleum, Öle, Alkohole und solche, die bei Erwärmung flüssig werden wie Fette, Wachse und ähnliche Stoffe. Insofern erscheint es vernünftig, auch bestimmte thermoplastische Kunststoffe in diese Brandklasse einzuordnen, wenn sie nicht zur Glutbildung neigen. Die Gefährlichkeit der Stoffe der Brandklasse B ist im Wesentlichen davon abhängig, bei welcher Temperatur sie in ausreichendem Maße **Dämpfe** freisetzen, die gezündet werden können. Gradmesser hierfür sind solche sicherheitstechnische Kennzahlen wie **Flammpunkt, Zündgrenzen, Verdunstungszahl** u. a.

Brandklasse C:

Zur Brandklasse C gehören alle brennbaren Gase. Zu den Gasen werden Stoffe gezählt, deren Siedepunkt bei einem Druck von 1013 hPa unter 20 °C liegt. D. h., Stoffe die unter diesen Bedingungen nicht als Gas vorliegen, gehören nicht in diese Brandklasse. In die Brandklasse C gehören solche technischen Gase wie z. B. Wasserstoff, Methan, Propan, Butan u. a. Technische Gase werden im Allgemeinen in Druckgasflaschen und -behältern transportiert und sind in Leitungen und anderen Bereichen technischer Anla-

gen anzutreffen. Für die Gefährlichkeit der Gase sind die sicherheitstechnischen Kennzahlen (siehe Pkt. 1.4.3) ausschlaggebend.

Brandklasse D:

In die Brandklasse D gehören die brennbaren Metalle. Außer den Edelmetallen sind zwar alle Metalle unter bestimmten Voraussetzungen, z. B. in fein verteilter Form oder bei erhöhtem Sauerstoffgehalt der Luft, brennbar. In die Brandklasse D gehören jedoch neben den Schwermetallen Zirkonium und Uran hauptsächlich die Leichtmetalle wie Magnesium und Aluminium sowie Natrium und Kalium.

Brandklasse F:

Im Rahmen der Überarbeitung DIN EN 2 im Januar 2005 wurde neben den bisher bekannten Brandklassen A, B, C und D jetzt auch die Brandklasse F aufgenommen. Die Brandklasse F beschreibt Fettbrände in Frittier- und Fettbackgeräten und anderen Kücheneinrichtungen und -geräten.

1.3 Verbrennungsprozess

1.3.1 Brandarten

Brände sind in ihrer Erscheinung stets einmalig, doch werden sie definitionsgemäß in die Branderscheinungsformen Flammenbrand und Glutbrand unterteilt.

1.3.1.1 Der Flammenbrand

Der Flammenbrand ist durch eine Flamme als äußeres Erscheinungsmerkmal der Verbrennung von Gasen und Dämpfen charakterisiert. Die Flamme stellt bildhaft näherungsweise das Reaktionsvolumen dar, in dem sich die überwiegend exothermen Reaktionen zwischen den brennbaren Gasen und Dämpfen mit dem Sauerstoff der Luft vollziehen. Dabei können die infolge Verdampfung und/oder Pyrolyse freiwerdenden brennbaren Gase und Dämpfe sowohl von gasförmigen Ausgangsstoffen als auch von Flüssigkeiten sowie von brennbaren Feststoffen herrühren. Die Erscheinung der Flamme ist in der Regel mit intensiver **Licht- und Wärmestrahlung** (siehe auch Pkt. 1.5) gekoppelt.

Flammenarten

Je nach Zumischung der zur Verbrennung benötigten Luft unterscheidet man zwischen **Diffusionsflammen** und **vorgemischten Flammen** (Einzelheiten siehe dort).

In einer Diffusionsflamme wird die Gesamtgeschwindigkeit durch die Geschwindigkeit des langsamsten Teilvorgangs bestimmt, das ist die Brennstoff-Luft-Vermischung in Form von Diffusion. In Abhängigkeit von der Größe des brennbaren Gas- oder Dampfdurchsatzes und seiner Durchflussgeschwindigkeit wird zwischen laminaren und turbulenten Diffusionsflammen unterschieden. Von Diffusionsflammen ist dann auszugehen, wenn z. B. ein brennbares Gas langsam aus einer Öffnung strömt und der für die Verbrennung notwendige Sauerstoff aus der Umgebung in den Brennstoff diffundiert. Derartige Flammen wurden früher auch als Leuchtblammen bezeichnet. Konkret ist bei

Diffusionsflammen der größte Teil des Flammenvolumens nur vom brennbaren Stoff, nicht aber mit einem Brennstoff/Sauerstoff-Gemisch ausgefüllt. Die Verbrennungszone stellt somit nur eine dünne Schicht auf der Flammenoberfläche dar. Die Verbrennungsgeschwindigkeit in der Diffusionsflamme wird sehr stark von der Diffusionsgeschwindigkeit des Sauerstoffs beeinflusst. Die laminare Diffusionsflamme tritt also bei kleinen Gas- oder Dampfdurchsätzen auf, die sich mit geringen Geschwindigkeiten bewegen. Typische Beispiele sind die Kerzen- und Zündholzflamme. Der prinzipielle Aufbau einer laminaren Diffusionsflamme wird in Abb. 10 am Beispiel eines Flüssigkeitsbrandes in einem Gefäß mit geringem Durchmesser dargestellt. Die Flamme besteht aus einer dünnen Verbrennungszone und einem großen Dampfvolumen. Auch bei Gasen und festen Stoffen stellt sich der Flammenaufbau ähnlich wie in Abb. 10 dar, solange sich die Strömung der Gase und Dämpfe in einem laminaren Bereich bewegt. Die eigentliche Reaktion (Verbrennung) vollzieht sich in einer dünnen Schicht (Verbrennungszone) und ist die Ursache für den Stofftransport durch Diffusion zwischen den angrenzenden Luft- und Brandstoffschichten. Durch die Verbrennungsreaktion wird ein Konzentrationsgefälle erzeugt, welches in Form der molekularen Diffusion wieder ausgeglichen wird. Der Gesamtprozess ist insofern komplex zu sehen, da er einerseits in Form der Diffusion den Massetransport beinhaltet und andererseits in Form eines Temperaturausgleichs einen Wärmetransportprozess.

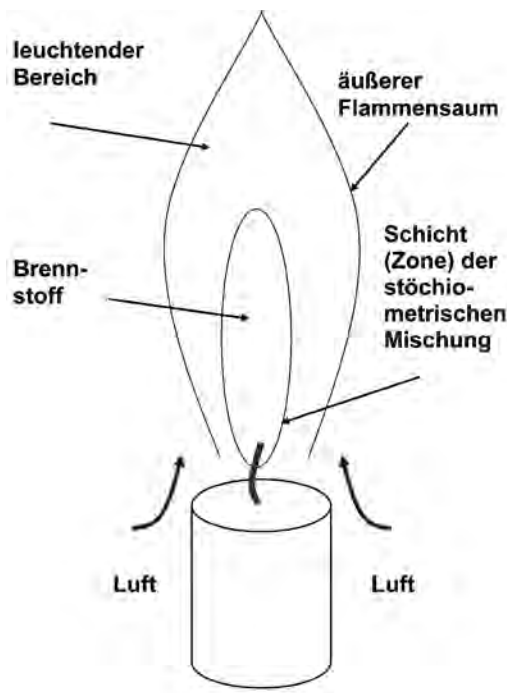


Abb. 7: Aufbau einer laminaren Diffusionsflamme

Die sich in der Verbrennungszone bildenden gasförmigen Verbrennungsprodukte diffundieren sowohl in die Luft als auch in den Bereich der brennbaren Gase und Dämpfe. In

einer kleinen Flamme breiten sich die gasförmigen Verbrennungsprodukte über das gesamte Volumen der Gase und Dämpfe aus. Bei großen Flammen befinden sich die gasförmigen Verbrennungsprodukte nur nahe der Verbrennungszone. Die Sauerstoffkonzentration sinkt bei Annäherung an das Dampfvolmen schnell bis auf Null, da der Sauerstoff vollständig verbraucht wird. Deshalb kann der Sauerstoff an dieser Stelle nicht in die Dampfzone diffundieren und es kann in diesem Bereich auch keine Verbrennung stattfinden.

Als Maß zur Unterscheidung zwischen laminarer und turbulenter Strömung dient die REYNOLDS-Zahl (Re), welche temperaturabhängig ist.

Es gilt:

$$\text{Re} = \frac{d \cdot W}{\nu} \quad (4), \text{ wobei}$$

[d] - der Rohrdurchmesser oder der Durchmesser der Brandfläche in m,

[W] - die Strömungsgeschwindigkeit in m s^{-1} und

[ν] - die kinematische Zähigkeit des strömenden Mediums in $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ bedeuten.

Bei Überschreitung der kritischen Re-Zahl tritt Turbulenz ein. Dies gilt im übertragenen Sinne auch für Diffusionsflammen. Turbulenz liegt vor, wenn ein Brenngasstrahl aus engen Öffnungen unter hohem Druck austritt oder wenn bei Schadenfeuern der Durchmesser der Brandfläche etwa 1 m überschreitet. Erhöht sich die Austrittsgeschwindigkeit eines Gases bei konstantem Durchmesser der Austrittsöffnung, so wird der Übergang von der laminaren in die turbulente Flammenform sichtbar. Bei der turbulenten Diffusionsflamme ändert sich die augenblickliche Flammenfront in Sekundenbruchteilen. Da die Strömungsgeschwindigkeit bei turbulenten Flammen die bei laminaren Flammen um ein Vielfaches übersteigt, ist die turbulente Diffusionsflamme kürzer als die laminare. Die für die Verbrennung erforderliche völlige Durchmischung der Gase erfolgt aber auch bei einer turbulenten Diffusionsflamme durch Diffusion, z. B. innerhalb eines Wirbels. Die turbulente Flamme ist durch keine klaren Umrisse und eine schwankende Flammenfront gekennzeichnet. Zusammenfassend kann somit gesagt werden:

Bei kleinen Ausströmgeschwindigkeiten eines Gases ist die Flammenhöhe dem Geschwindigkeitszuwachs nahezu proportional. Die Re-Zahl überschreitet nicht die kritische Größe (2300 – im glatten Rohr 1000 bis 2500) und die Strömung ist laminar. Bei Re-Zahl > 2300 pulsiert der obere Teil der Flamme, was zu einer schwankenden Flammenhöhe führt. Bei weiterem Anwachsen der Strömungsgeschwindigkeit des Gases vergrößert sich der pulsierende Teil der Flamme und die Flammenhöhe verringert sich (Übergangsbereich). Bei Überschreitung eines Brandflächendurchmessers von einem Meter insbesondere bei Bränden brennbarer Flüssigkeiten im Freien wird durch den Auftrieb der heißen Gase die Strömungsgeschwindigkeit so groß, dass es zur Ausbildung turbulenter Diffusionsflammen kommt. Bei der turbulenten Bewegung ändert sich die Geschwindigkeit des Gases an jedem Punkt des Stromes, sowohl hinsichtlich der Größe als auch der Richtung. Für eine längere Zeitspanne kann für die Geschwindigkeit eine mittlere, konstante Größe angegeben werden. Die Differenz zwischen der augenblicklichen und der mittleren Geschwindigkeit wird als pulsierende Geschwindigkeit v'_{Fj} bezeichnet.

Ist die pulsierende Geschwindigkeit quer zum Gasstrom gerichtet, so findet ein intensiver Stofftransport in Form von einzelnen Elementarvolumen von einer Schicht des sich bewegenden Stromes zur anderen statt. Dabei ist zwischen kleinen und großen Wirbeln zu unterscheiden, die unregelmäßig entstehen und verlöschen. Während die kleinen Wirbel maßgebend für die Strömungsverluste sind, bewirken die großen Wirbel den Austausch von Impuls, Wärme und Stoff senkrecht zur Hauptströmung. Solch ein Stofftransport wird als turbulente Diffusion bezeichnet. Die turbulente Flamme ist durch keine klaren Umrisse und eine schwankende Flammenfront gekennzeichnet.

Wird Luft durch Strahlwirkung, wie z. B. im Bunsenbrenner oder auf andere Weise dem Brenngas vor der Flamme zugeführt (Primärluft), dann spricht man von Vormischungsflammen, vorgemischten Flammen oder auch Bunsenflammen. Die von diesen Flammen zusätzlich aus der Umgebung aufgenommene Luft heißt Sekundärluft. Sie ist für die vollständige Verbrennung erforderlich, da der Primärluftanteil immer kleiner ist, als für eine Verbrennung unter stöchiometrischen Bedingungen notwendig. Die Summe von Primärluft und Sekundärluft ergibt den Luftbedarf. Vorgemischte Flammen treten bei stationären Verbrennungsvorgängen auf, wie z. B. an Bunsenbrenner und am Schweißbrenner. Die Geschwindigkeit der Verbrennung wird in vorgemischten Flammen von der Kinetik der Verbrennung bestimmt. Auch vorgemischte Flammen können sowohl laminar als auch turbulent sein.

Nach dem Bewegungszustand unterscheidet man zwischen stationären und instationären Flammen. Stationäre Flammen liegen z. B. vor, wenn eine Flamme fest an einer Brennerdüse haftet. Pflanzt sich die Flammenfront vom Ort der Zündung fort, so spricht man von instationären Flammen. Das Auftreten von instationären Flammen setzt die Bildung von explosiblen Gemischen vor der Verbrennung voraus. Instationäre Flammen werden auch als kinetische Flammen bezeichnet, weil ihre Verbrennungsgeschwindigkeit nicht mehr durch die Diffusion bestimmt wird, sondern nur noch von der Geschwindigkeit der Red-Ox-Reaktion, was zu hohen Fortpflanzungsgeschwindigkeiten führt, wie sie bei **Verpuffungen**, **Explosionen** und **Detonationen** beobachtet werden.

Temperaturverteilung in Flammen

Die auftretenden Flammen besitzen ein Temperaturfeld, d. h. die Flamme besteht aus Bereichen unterschiedlicher Temperatur. So ist die Temperatur der Flamme in der Verbrennungszone von der Flammenhöhe abhängig (Abb. 8). Im Vertikalschnitt durch die Flamme zeigt sich eine starke Höhenabhängigkeit. In den brandstoffnahen Bereichen der Flamme werden die niedrigsten Temperaturen gemessen. Dies ist auf die niedrige Temperatur der unten und seitlich eintretenden Luft aus der umgebenden Atmosphäre zurückzuführen. Die vergleichsweise hohen Temperaturen im oberen Flammenbereich lassen sich durch eine Erhöhung der Lufttemperatur in den oberen Schichten erklären, weil die einströmende Luft durch erwärmten gasförmigen Verbrennungsprodukte diffundieren muss und sich eine Einschnürung des Flammendurchmessers ergibt. Im oberen Teil der Flamme verringert sich die Temperatur in der Verbrennungszone insofern, weil sich durch das Anwachsen der Zone mit den Verbrennungsprodukten der Diffusionsweg für den Sauerstoff verlängert und infolge dessen die stöchiometrische Konzentration nicht erreicht wird. Im Ergebnis verläuft die Verbrennung im obersten Teil der Flamme unvollständig und es bilden sich kohlenstoffreiche Produkte wie Russ.

Wie vorgenannt, ist die Temperatur in der Vorbereitungszone der Verbrennung deutlich niedriger als in der Verbrennungszone. Nahe der Flüssigkeitsoberfläche entspricht die Dampftemperatur der Siedetemperatur. In Richtung auf die Verbrennungszone und mit zunehmender Höhe innerhalb der Flammensäule, d.h. mit zunehmender Entfernung von der Basisfläche der Flamme, steigt die Temperatur steil an. Die Gründe hierfür sind in der Wärmestrahlung der Verbrennungszone und in der Diffusion erwärmter Verbrennungsprodukte zu sehen. Auf Grund der hohen Temperaturen werden die Moleküle der Gase und Dämpfe zersetzt, d. h. es bilden sich Atome und freie Radikale, die in die Verbrennungszone eintreten und dort die hohe Reaktionsgeschwindigkeit bedingen. Die Temperaturverteilung (schematisch) in einem Poolfeuer verdeutlicht die rechtsseitige der beiden nachfolgenden Abbildungen.

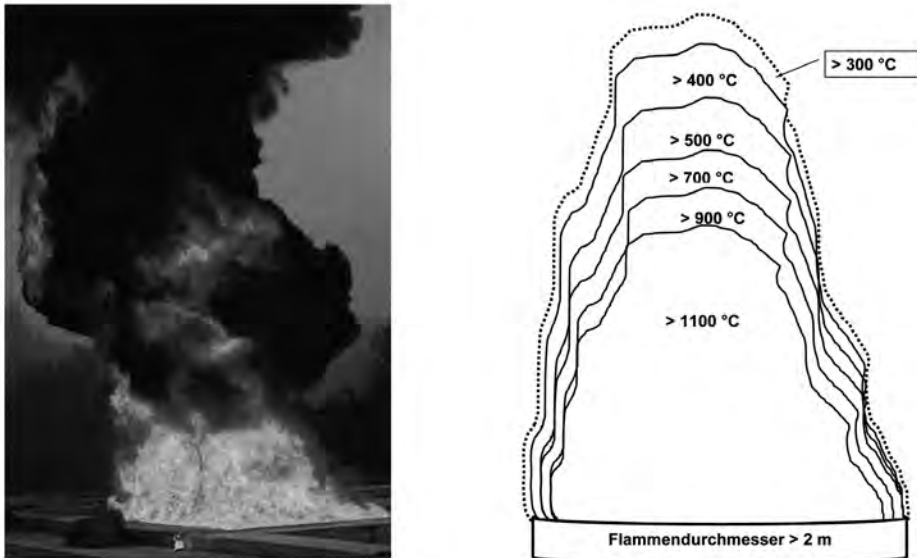


Abb. 8: Reale Poolfeuerflamme und Temperaturprofile in einer solchen Flamme - schematisch

Charakteristik der bei Bränden auftretenden Flammen

Wie schon vorgenannt, sind die bei Bränden auftretenden Flammen in der Regel Diffusionsflammen. Laminare Diffusionsflammen sind charakteristisch für Brände mit geringer Ausdehnung (bei Flüssigkeiten Durchmesser $\ll 1$ m). Sie treten vor allem in der Entstehungsphase eines Brandes auf. Dagegen sind turbulente Diffusionsflammen bei Bränden sehr häufig. Sie treten vor allem bei entwickelten Flüssigkeitsbränden, Feststoffbränden und bei Bränden unter Druck austretender Gase auf. Oft sind sie auch das Ergebnis eines grundsätzlichen Wandels des Verbrennungsablaufes, d. h. sie können aus laminaren Diffusionsflammen entstehen, wenn sich durch eine Intensivierung der Verbrennung eine turbulente Strömung ausbildet. Charakteristisch für Flüssigkeitsbrände mit turbulenter Flamme ist das Erscheinungsbild der Ausbildung von Gasballen (hot spots, auch flying angels) [1.2], die fast nur aus brennbaren Dämpfen bestehen, die hoch aufsteigen und in einem deutlichen Abstand über der ständigen Flammenzone zünden und verbrennen.

Strahlungscharakter der Flammen

Jeder warme Körper ($T > 0 \text{ K}$) emittiert elektromagnetische Strahlung. Die Strahlungsenergie E ist abhängig von der Wellenlänge λ . Für alle Körper gilt, dass der Emissionsgrad $\varepsilon(\lambda, T)$ gleich dem Absorptionsgrad $\alpha(\lambda, T)$ ist (Kirchhoffsche Strahlungsgesetz). Je nach Temperatur und Wellenlänge strahlt und absorbiert der als Idealfall betrachtete schwarze Körper am besten ($\varepsilon = 1$). Heiße Gase – dazu gehören im umfassenden Sinne auch die Flammen – emittieren nur in charakteristischen Wellenlängenbereichen (Bandenstrahler). Feste Stoffe und hierzu sind auch der Ruß oder andere Feststoffanteile in der Flamme zu zählen, emittieren je nach Temperatur kontinuierlich Strahlung in einem größeren Wellenlängenbereich (kontinuierliches Spektrum). Rein von ihrem optischen Erscheinungsbild unterscheiden sich die Flammenbrände. Es gibt leuchtende und nicht leuchtende Flammen. Nichtleuchtende bzw. schwachleuchtende Flammen sind bei Tageslicht kaum sichtbar – sie leuchten nur schwach Blau und entstehen bei der Verbrennung von Wasserstoff, Kohlenmonoxid, Cyanwasserstoff, Schwefel, Methanol und anderen kohlenstoffarmen Stoffen. Bei der Verbrennung der vorgenannten Stoffe werden vor allem Gase gebildet, wobei ein- bzw. zweiatomige Gase nur ein geringes Emissions- und Absorptionsvermögen aufweisen (H_2 , CO u. a.). Mehratomige Gase wie CO_2 und H_2O – Wasserdampf, die vor allem bei der Verbrennung vorgenannter Stoffe entstehen, besitzen dagegen ein erhebliches Emissions- und Absorptionsvermögen. Dennoch emittieren und absorbieren sie in bestimmten Wellenlängen, d. h. sie sind selektive Strahler. Leuchtende Flammen besitzen eine intensive Flammenfärbung, die auch bei Tageslicht gut sichtbar ist. Leuchtende Flammen sind häufig gelb gefärbt. Das beruht auf der Lichtausstrahlung glühender Kohlenstoffteilchen. Sie ist charakteristisch für Flammen bei Holz-, Papier-, Kraftstoff- und anderen kohlenstoffreichen Brandstoffen. Häufig treten bei Bränden auch spezifische Färbungen auf, die auf das Vorhandensein von Chemikalien (z. B. Metallsalze), von Metallen u. a. Stoffen zurückgeführt werden können. Da die Flammenstrahlung vor allem aus einem Anteil Festkörperstrahlung der Rußpartikel und anderer fester Stoffpartikel (Asche) und einem Anteil der Bandenstrahlung solcher Gase wie CO_2 und H_2O besteht, werden sie als graue Strahler bezeichnet.

Die Strahlung einer Flamme lässt sich näherungsweise wie folgt berechnen (Stefan-Boltzmann-Gesetz) (siehe auch Punkt 4.3.4):

$$I_{St} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot T_{Fl}^4 \quad (5)$$

Es bedeuten:

[ε] - Emissionsgrad

[σ] - STEFAN-BOLTZMANN-Konstante = $5,7 \cdot 10^{-11} \text{ kJ m}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ K}^{-4}$

[T_F] - Flammentemperatur in K ($T_F = \vartheta_F + 273 \text{ Kelvin}$)

[A] - Fläche, die die Wärme absorbiert in m^2

Für die gleichzeitig aus der Umgebung absorbierte Wärme gilt:

$$I_{St} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot (T_1^4 - T_2^4) \quad (6)$$

Es bedeuten

[A] - Fläche, die die Wärme absorbiert in m²

[T₁, T₂] - Temperatur von Strahler- und Empfängerfläche in K

Die Wärmestromdichte in Form der Flammenstrahlung ist dem Produkt aus Absorptionsfläche A und der 4. Potenz der Temperaturdifferenz von Strahler und Empfänger proportional. Die in diesem Zusammenhang eingeführte Größe ε ist grundsätzlich abhängig vom jeweiligen Material (Strahlungsmedium), dessen Temperatur und der Oberflächenbeschaffenheit der Strahleroberfläche.

Für die Wärmestromdichte der Flammenstrahlung auf ein benachbartes Objekt gilt:

$$\dot{q}_{St}'' = \varphi_{1,2} \cdot \varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2 \cdot \sigma \cdot \frac{A_1}{A_2} \cdot \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \quad (7)$$

Es bedeuten:

[ε] - Emissionsgrad Strahler bzw. Empfänger

[σ] - STEFAN-BOLTZMANN-Konstante = 5,7·10⁻¹¹ kJ m⁻² s⁻¹ K⁻⁴

[T₁, T₂] - Strahler(Flammen)temperatur bzw. Empfängertemperatur in K

[A₁, A₂] - Strahlerfläche bzw. Empfängerfläche in m²

[T₁, T₂] - Temperatur von Strahler- und Empfängerfläche in K

[φ_{12}] - Einstrahlzahl

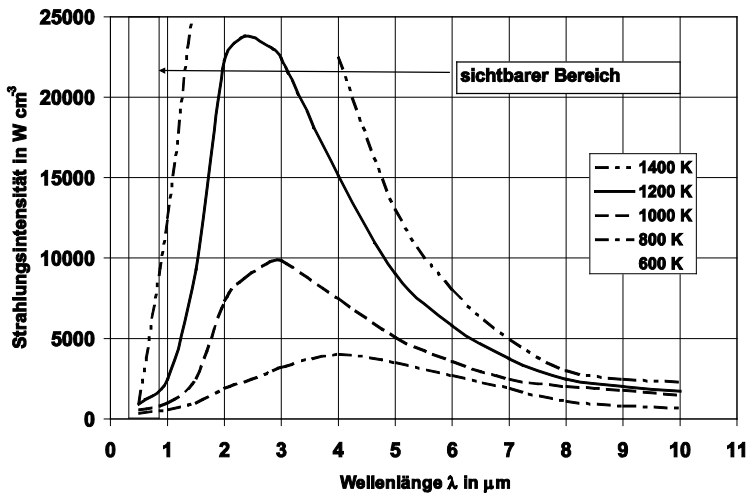


Abb. 9: Energieverteilung im Spektrum des schwarzen Körpers als Funktion der Wellenlänge λ .

Das Emissionsverhältnis von Flammen bei Bränden mit hohen Anteilen an Kohlenwasserstoffen beträgt 0,9 bis < 1 , d.h. es handelt sich um sogenannte graue Strahler (fast schwarzer Körper). Strahlungsleistungen von Bränden werden für die Berechnung von Sicherheitsabständen und Schutzausrüstungen benötigt. Bei Versuchsbränden (Poolfeuer) wurden durch Messung bzw. rechnerische Abschätzungen Wärmestromdichten in Form von Strahlung in Größenordnung von 100 kW m^{-2} bis 150 kW m^{-2} für Tankbrände mit einem Durchmesser $< 2,0 \text{ m}$ [1.5] ermittelt. Nach [1.3] werden für größere Durchmesser ca. 40 kW m^{-2} auf Grund sich ändernder Flammenstrukturen genannt. Eine schematische Verteilung der Strahlungsleistung einer Tankflamme zeigt die nachfolgende Abbildung.

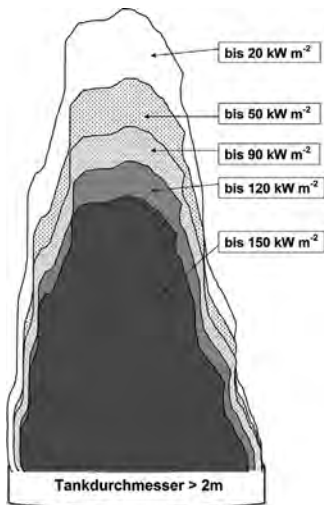
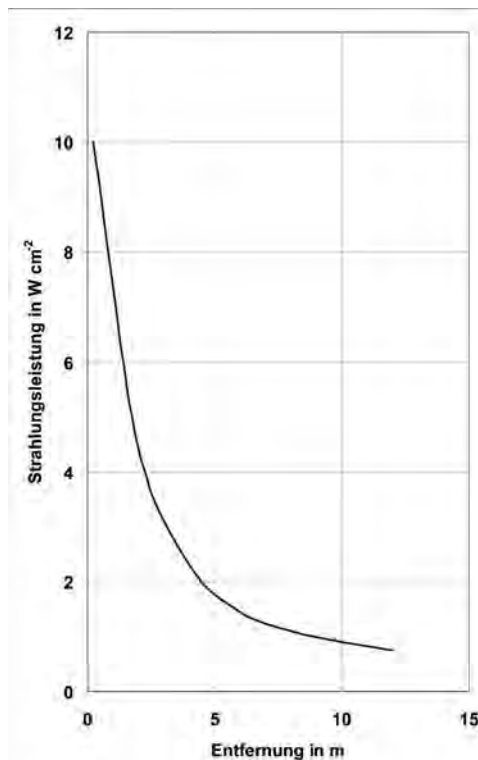


Abb. 10: Strahlungsquelle „Tankflamme“

Wie schon ausgeführt, können sich Feststoffe entzünden, wenn sie einer Wärmestrahlung mit einer entsprechenden Energiestromdichte ausgesetzt werden (siehe nachfolgende Tabellen 4 und 5). Die für eine Zündung mindestens notwendige Energiestromdichte wäre als **minimale zündwirksame Wärmestrahlungsdichte** zu bezeichnen. Die Zeitdauer bis zur Entzündung hängt im Wesentlichen von Stoffeigenschaften wie Brennbarkeit, Oberflächenbeschaffenheit, Absorptionsvermögen u. a., den Parametern der Strahlungsquelle (Temperatur, Strahlungsleistung, Art des Strahlers u. a.) sowie den geometrischen Verhältnissen (Abstand, Einfallswinkel) ab. Grundsätzlich nimmt die Zündzeit zu, wenn die einfallende Energiestromdichte der Strahlungsquelle abnimmt. Hieraus ergibt sich für die Wärmestrahlung eine minimale zündwirksame Energiestromdichte, die nach einer endlich langen Zeitspanne gerade noch eine Zündung bewirkt. Die nachfolgende Abbildung soll die Abnahme der Strahlungsleistung einer Tankbrandflamme mit zunehmender Entfernung verdeutlichen.

**Abb. 11:** Strahlungsleistung einer Tankflamme mit einem Durchmesser von ca. 2,0 m in Abhängigkeit von der Entfernung

Kritische Wärmestrahlungsbelastungen lassen sich unter Zugrundelegung unterschiedlichster Modelle und Annahmen darstellen und berechnen. Die nachfolgende Abbildung soll unter Annahme einer Flamme als Flächenstrahler die Wirkung gegenüber einem mit

einer brennbaren Flüssigkeit gefüllten offenen Behälter als waagrecht liegende kreisförmige Scheibe verdeutlichen.

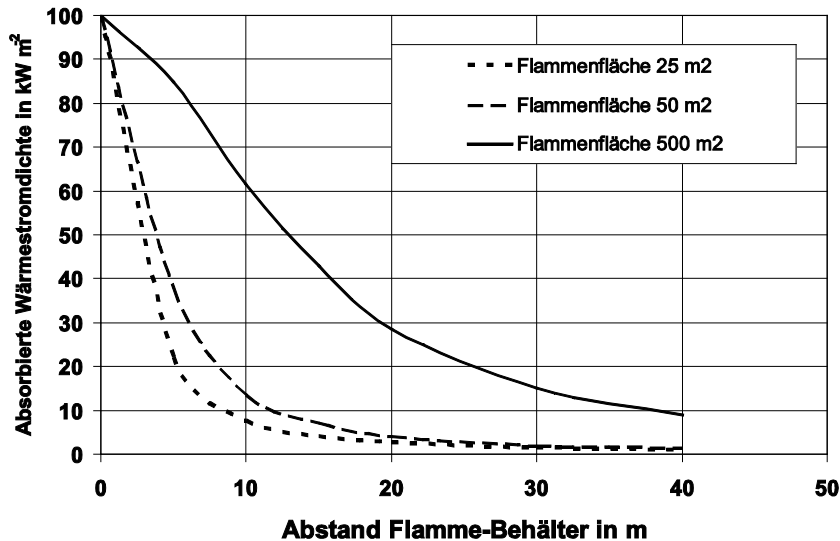


Abb. 12: Darstellung des Verhältnisses von Behälterentfernung zur absorbierten Wärmestromdichte bei unterschiedlich großen Flammen

Unter Bezug auf Abbildung 12 ergibt sich, dass bei einer projizierten Flammenfläche von 10 m² für einen Abstand von 0 m von einer absorbierten Wärmestromdichte in Höhe von 100 kW m² und bei einer Entfernung von 5 m von 11 kW m² auszugehen ist. Auf diesem Grund werden Sicherheitsabstände im Rahmen der Umsetzung des Störfallrechts [1.6] auf der Grundlage von Berechnungsmodellen zur Übertragung von Wärmestrahlung auf benachbarte Objekte als eine wesentliche Voraussetzung zur Verhinderung der Brandentstehung und -ausbreitung festgelegt. In diesem Zusammenhang werden für die Wärmestrahlung, resultierend aus Tankflammen, nachfolgende Grenzwerte empfohlen.

Tab. 4: Selbstentzündungsbedingungen ohne Schutzmaßnahmen und andere Effekte

Bestrahlungsstärke in kW m ⁻²	Wirkung/Entzündung	Einwirkungsdauer in s
1,3	Maximale Sonneneinstrahlung	-
5,0	Platzen von Fensterscheiben	6
7,0	Kunstfaser	sofort
8,0 bis 13,0	Papier	5 bis 8
9,2	Schmieröl an Maschinen	-
12,2	Anstrichfarbe an Anlagenteilen	-
24,0	Baumwollgewebe	900
25,0	Ungestrichene Holzfaserplatte	900
32,0	Ungestrichenes Holz	900
42,0	Stahlkonstruktionen versagen	900
84,0	duroplastischer Kunststoff	900

Tab. 5: Zulässigkeit kritischer Bestrahlungsstärken beliebiger Dauer

Zu schützendes Objekt	Kritische Bestrahlungsstärke in kW m ⁻²
Grenze für nachteilige Wirkungen	1,6
Empfindliche Gebäude: Krankenhäuser, Altenheime, Schulen, Wohnhäuser	2,0
Öffentliche Straßen	4,5
Grenze für wahrscheinliche Feuerübertragung	8,0
Ungekühlte Lagertanks	10,0
Fabrikgebäude: Leitwarten, Werkstätten	12,6
Gekühlte Lagertanks	37,8

Hinsichtlich des Eintritts eines **Flashovers** bedingt durch Wärmestrahlung der sich ausbildenden Heißgasschicht wird auf die Ausführungen unter Punkt 1.7 verwiesen.

Die Tabelle 6 verdeutlicht, in welchem Maße sich Wärmestrahlung nachteilig gegenüber Menschen auswirkt.

Tab. 6: Grenzwerte für Wärmestrahlungsexposition bei Menschen (DIN 33 403-3)

Wärmestrahlung in $\text{kJ m}^{-2} \text{s}^{-1}$	Resultat	Einwirkungsdauer in s
7 ... 10	Schmerzempfindung	5
2,9	Schmerzempfindung	50
1,5	Schmerzempfindung	600

Flammengröße

Einen weiteren wichtigen Aspekt stellt die Größe der Brandflammen bei Schadenfeuern dar und das vor allem deshalb, weil die Flammengröße eine wichtige Information für die Abschätzung der Wärmestrahlung auf die Brandstoffoberfläche aber auch für die Wärmeübertragung auf die weitere Umgebung liefert. Aus Ergebnissen von experimentellen Arbeiten ist bekannt, dass die Flammenhöhe turbulenter Diffusionsflammen bei Schadenfeuern in Verbindung mit Flüssigkeiten und festen Stoffen im Bereich von 1 m bis 15 m Durchmesser zwischen 1,5 m und 20 m liegt. Bei einem Holzstapelbrand mit einer Grundfläche von 6 m x 6 m und einer Stapelhöhe von ebenfalls 6 m entstanden Flammen mit einer Höhe zwischen 12 m und 21,4 m. Ein brennender mit Ottokraftstoff gefüllter Tank (Durchmesser 2,6 m) führt zu Flammenhöhen von 4,4 m. Bei einem Durchmesser des Tanks von 30 m erreicht sie hingegen nur 39 m.

Auf der Grundlage einer Vielzahl empirisch ermittelter Ergebnisse wurden unterschiedlichste Modellansätze entwickelt [1.7], [1.8], wobei sich der nachfolgende Modellansatz weitestgehend durchgesetzt hat:

$$\frac{h_f}{d_o} = 55 \left(\frac{\dot{m}_f''}{\rho_o \cdot \sqrt{g \cdot d_o}} \right)^{0,61} \quad (8)$$

$[h_f]$ - Flammenlänge in m

$[d_o]$ - Flammendurchmesser in m

$[\dot{m}_f'']$ - spezifische Abbrandgeschwindigkeit in $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$

$[\rho_o]$ - Dichte der Umgebungszone in kg m^{-3}

$[g]$ - Erdbeschleunigung in m s^{-2}

Es kann auch ein vereinfachter Ansatz gemäß Gleichung (9) verwendet werden.

$$h_f = 1,5 \cdot d_o \quad (9)$$

Für windgeneigte Flammen kann unter Bezug auf Gleichung (8) näherungsweise die Gleichung (10) angewandt werden.

$$\frac{h_f}{d_o} = 55 \left[\frac{\dot{m}''_f}{\rho_o \cdot \sqrt{g \cdot d_o}} \right]^{0,67} \left(\frac{v_w}{v_c} \right)^{-0,21}, \text{ wobei} \quad (10)$$

$$v_c = \left[\frac{g \cdot \dot{m}''_f \cdot d_o}{\rho_o} \right]^{0,33}$$

[v_w] - Geschwindigkeit des Windes in m s^{-1}

[v] - Geschwindigkeit der aufsteigenden Brandstoffdämpfe in m s^{-1}

Die weiteren Angaben entsprechen den Erläuterungen zur Gleichung (8)

Zur Charakterisierung der in den Flammen gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten sollen die nachfolgenden Angaben dienen. So wurden für Kohlenwasserstoffbrände z. B. folgende Größenordnungen für Aufstiegsgeschwindigkeiten angegeben:

Aufstiegsgeschwindigkeit der Brandstoffdämpfe = $0,01 \text{ m s}^{-1}$

Aufstiegsgeschwindigkeit der heißen Rauchgase = $1,00 \text{ bis } 10 \text{ m s}^{-1}$

1.3.2 Glutbrand

Verläuft der Brand nur im Bereich der Feststoffphase (ein entsprechendes Oxidationsmittel z. B. der Sauerstoff der Luft reagiert mit dem Brandstoff innerhalb der festen Phase) und unter deutlicher Glutausbildung spricht man von einem Glutbrand (Verbrennung von Koks, Metall u. ä.). Unter Glut wird der Zustand eines festen Körpers verstanden, in den er durch Temperaturerhöhung versetzt wird. Ein solcher erhitzter Feststoff gibt Energie in Form von Licht- und Wärmestrahlung an seine Umgebung ab. Ursache sind die thermisch bedingten Schwingungen der Gitterbausteine des Feststoffs. Die der Licht- und/oder Wärmestrahlung zugrunde liegende Wellenlänge ist für bestimmte Temperaturbereiche charakteristisch. So erreicht Stahl

- bei $\approx 550 \text{ }^\circ\text{C}$ beginnende Rotglut
- bei $\approx 700 \text{ }^\circ\text{C}$ Dunkelrotglut
- bei $\approx 900 \text{ }^\circ\text{C}$ Hellrotglut
- bei $\approx 1000 \text{ }^\circ\text{C}$ Gelbglut
- bei $\approx 1100 \text{ }^\circ\text{C}$ beginnende Weißglut und
- bei $\approx 1500 \text{ }^\circ\text{C}$ Weißglut

Allgemein gilt, dass **glühende nichtbrennbare Stoffe** in einer Luftströmung auf Grund des Wärmeübergang schnell abkühlen, während **glühende brennbare Stoffe** in einer Luftströmung durch die an der Oberfläche ablaufende Verbrennung (heterogene Verbrennung) zur Ausbildung von Flammen aktiviert werden können. Der Glutbrand ist insbesondere dadurch gekennzeichnet, dass die langsam verlaufende Verbrennung von der Geschwindigkeit einer heterogenen Reaktion, nämlich der Sauerstoffanlagerung an den glühenden Feststoff bestimmt wird. Häufig handelt es sich beim Glutbrand um kohlenstoffreiche Stoffe, die in fester Phase Sauerstoff anlagern. Gleiches gilt auch für die Verbrennung von Metallen in Luft. Wie schon vorgenannt, müssen Flammen nicht zwingend auftreten.

Der Reaktionsmechanismus einer solchen heterogenen Verbrennung ist recht kompliziert und soll nicht behandelt werden.

Kann die Verbrennung von Metallen einerseits dem Glutbrand zugeordnet werden, so ist deren Verbrennung auch in Form eines Flammenbrandes möglich. Während z. B. Magnesium als Funken über die Dampfphase in Form eines Flammenbrandes verbrennt (Verbrennungstemperatur > 3000 K), ist die Verbrennung von Stahlfunken in Luft ein typischer Glutbrand, der unter Ausbildung einer schmelzflüssigen Schlacke abläuft. Im Vergleich zu Flammenbränden sind die Brandtemperaturen bei Glutbränden relativ niedrig und die **Abbrand-** sowie die **Brandausbreitungsgeschwindigkeit** sind gering. Zum Glutbrand sind z. B. Kohlenstaub, Ruß und pyrophore Metalle befähigt.

Der Glutbrand kann als Erscheinungsform auch als weitere Phase des Verbrennens von solchen Stoffen beobachtet werden, die infolge der fortschreitenden vollständigen Pyrolyse Kohlenstoffstrukturen ausbilden. Dazu gehören vor allem cellulosehaltige Stoffe, wie z. B. Holz, Papier, Pappe, Baumwolle, Schilf, Stroh und Tabak, aber auch nicht-schmelzende Kunststoffe (Duroplaste).

Wird die Frischluftzufuhr bei Glutbränden erhöht, bestimmt vor allem die Strömungsgeschwindigkeit der Zuluft den für die Verbrennung notwendigen Sauerstofftransport und nicht mehr die vorher für den Sauerstofftransport wirksame Diffusion. In der Regel nehmen die Wärmefreisetzungsrate und die Verbrennungstemperatur zu. Der Glutbrand geht in einen gemischten Brand (Glut-/Flammenbrand) über. Ein solcher Brand entwickelt sich in einen Glutbrand zurück, wenn die Luftzufuhr so eingeschränkt wird, dass die Diffusion dominiert.

1.3.3 Sonderformen eines Brandes

1.3.3.1 Schwelbrand

Vollzieht sich die Verbrennung bei einer deutlich reduzierten Luftzufuhr (Luftmangel) spricht man von einem Schwelbrand. Der Schwelbrand ist infolge eines Sauerstoffmangels durch eine unvollständige Verbrennung gekennzeichnet und er verläuft ohne Flammerscheinungen. Er kann als eine Brandart mit spezifischem Erscheinungsbild und der Charakteristik eines Glutbrandes bezeichnet werden. Die infolge Verbrennung freierwerdende Wärme reicht gerade aus, um den Schwelprozess aufrechtzuerhalten. Die

Brandtemperatur ist niedrig, so dass keine Flammen und keine Glut auftreten. Infolge der unvollständigen stofflichen Umsetzung der bei einem Schwelbrand in großen Mengen freiwerdenden flüchtigen, unverbrannten Zersetzungsprodukte können sich bei deren Vermischung mit Luft explosive Gemische ausbilden, die zu einer schnellen Brandausbreitung durch Verpuffungen oder Explosionen beitragen können. Diese Erscheinung bezeichnet man auch als Durchzündung oder Backdraft (weiteres siehe Punkt 1.7.2). Die gefährliche Vermischung der Schwelgase mit Luft tritt ein, wenn die Luftzufuhr plötzlich erfolgt. Das ist in einem Raum z. B. möglich bei Zerstörung von Fensterscheiben, beim Öffnen von Fenstern oder Türen (weiteres siehe Raumbrand).

Wird die Luftzufuhr bei einem Schwelbrand intensiviert, kann er in einen Flammenbrand übergehen. Reine Schwelbrände treten oftmals in Schüttgütern insbesondere in Kohleschüttungen (auch Flözbrände unter Tage können Schwelbrände sein) sowie bei Futtermitteln, Getreide, Abfallstoffen u. a. auf. Bei Raumbränden ist die Wahrscheinlichkeit ihres Auftretens eher gering. Treten Schwelbrände auf, erfolgt das vor allem im Zusammenhang mit solchen wie den vorgenannten Stoffen.

1.3.3.2 Glimmbrand

Der Glimmbrand erweist sich ebenfalls als eine besondere Form eines Glutbrandes, wobei keine Flammerscheinungen aber Gluterscheinungen auftreten. Charakteristisch für den Glimmbrand ist, dass die infolge einer Wärmeeinwirkung freiwerdenden Pyrolysegase eine Temperatur aufweisen, die unterhalb der Zündtemperatur des Pyrolysegases liegt bzw. diese mit so geringer Geschwindigkeit entstehen, dass die untere Explosionsgrenze im entstehenden Gas/Dampf-Luftgemisch nicht erreicht wird. Der Glimmbrand ist als eine spezielle Phase im Sinne einer Zwischenstufe bei der Zündung und Selbstentzündung fester brennbarer Stoffe zu verstehen, wobei ein Glimmbrand z. B. bei

- Erhöhung der Temperatur
- Erhöhung der Pyrolysegeschwindigkeit oder
- Veränderung der Pyrolysegaszusammensetzung

in einen Flammenbrand übergehen kann.

Langanhaltende Glimmbrände treten z. B. sehr häufig bei abgelagerten brennbaren Stäuben auf. Die sich dabei ausbildenden Glimmnester können bei Aufwirbelung der Staubablagerungen Staubexplosionen auslösen.

1.3.4 Brandentwicklung – Phasen eines Brandes

Die Brandentwicklung zeigt in allen Brandfällen, unabhängig vom Brandstoff und den äußeren Bedingungen, den nachfolgend dargestellten typischen Verlauf. So lassen sich drei Hauptbrandphasen nennen:

- der Entstehungsbrand mit der Zündung als Startpunkt
- der Vollbrand
- der abklingende Brand

Diese Phasen lassen sich insofern differenziert betrachten, indem der Temperaturverlauf des Brandes im Vergleich zur Branddauer (Zeit) beobachtet wird.

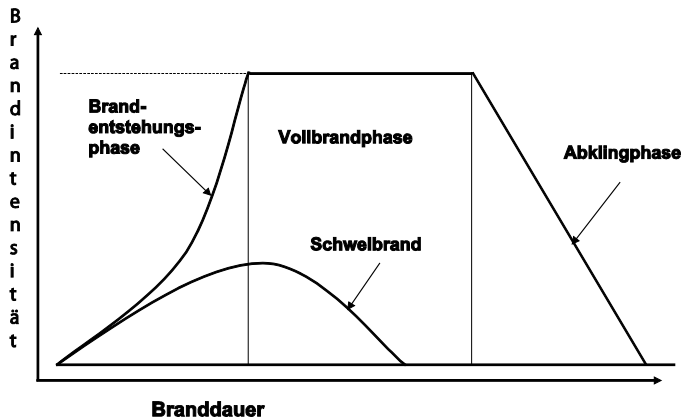


Abb. 13: Realbrandkurve – schematisch

Die zeitliche Entwicklung der Temperatur besitzt bei einem Brand einen charakteristischen Verlauf, wie entsprechend Abb. 13 dargestellt, und wird als Realbrandkurve bezeichnet. Der Verlauf ist durch mehrere charakteristische Phasen unterteilt. Die erste Phase ist die **Zündphase**. Daran schließt sich eine zum Teil sehr lang andauernde Phase der eigentlichen Brandentstehung an. In dieser Phase der Brandentwicklung steigt die Temperatur nur mäßig an, da der Brand im Allgemeinen auf den Entstehungsbereich begrenzt ist. Mit einer Vergrößerung des Brandes steigt die Brandraumtemperatur in einem solchen Maß, dass es insbesondere bei den lüftungsgesteuerten Bränden zum so genannten **Flashover** kommen kann. Der Brand ist von einer spontanen Flammenausbreitung über alle im Brandraum befindlichen Brandstoffe charakterisiert, es kommt zum Vollbrand. Daran schließt sich die Phase des vollentwickelten Brandes an. Diese Brandphase ist durch eine hohe, abhängig von Art und Menge des Brandstoffes sowie weiteren Randbedingungen, und anhaltende Wärmefreisetzung gekennzeichnet. Mit zunehmendem Verbrauch (Umsatz) an Brandstoff geht der Brand in die Abkühl- oder Abklingphase über. Der hier dargestellte Verlauf ist typisch für einen sich selbst steuernden Brand (brandlastgesteuert). Insbesondere unter Berücksichtigung von den Brandverlauf beeinträchtigenden Randbedingungen kann sich auch ein Brand mit einem gehemmten Verlauf ergeben, z. B. Brände in Räumen ohne Öffnungen oder infolge des frühzeitigen Ansprechens der Löschanlage (Eine Beschreibung des Sachverhaltes Raumbrände siehe Pkt.1.6).



Abb. 14: Einheitstemperaturzeitkurve (ETK) nach DIN 4102

Die Abb. 14 zeigt die ETK, die für verschiedene brandschutztechnische Prüfungen benutzt wird. Um einheitliche Prüfgrundlagen für das Brandverhalten der zu prüfenden Bauteile zu schaffen, wurde diese ETK international vereinbart, die durch die Gleichung $\theta_G = 20 + 345 \log(8t + 1)$ beschrieben wird (θ_G – Heißgastemperatur (Brandraumtemperatur) in °C, t - Versuchszeit in min). Sie weicht qualitativ erheblich vom realen Brandverlauf ab. Die ETK stellt somit eine Näherung bis zum Maximum des vollentwickelten Brandes dar. Sie erfasst damit die maximale Belastung durch einen Brand, wie es beispielsweise für die Untersuchung der Belastbarkeit von Baustoffen bei Bränden erforderlich ist. Genau für diesen Anwendungsfall wurde die ETK festgeschrieben. Für die Erforschung von Brandursachen hat die ETK keine Bedeutung.

Zur weiteren Charakterisierung des Brandablaufs werden folgende Parameter verwendet. Dies können sein:

- die vom Brand erfasste Fläche
- die Brandraumtemperatur in K
- der Wärmestrom des Brandes in W
- die Wärmestromdichte des Brandes in W m^{-2} bzw.
- die spezifische Abbrandgeschwindigkeit in $\text{kg m}^{-2} \text{min}^{-1}$ bzw. $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$

Weiterhin können dies sein:

- Eigenschaften der Brandstoffe
- ihre Verteilung im Raum und
- Art und Form der baulichen Hülle
- die Luftzufuhr u. a.

1.3.5 Brandrückstände

Wie schon genannt verläuft die Verbrennung bei realen Bränden weder vollkommen in Richtung der zu erwartenden Endprodukte noch vollständig bezogen auf den eingesetzten Brandstoff. Insofern sind bei realen Bränden immer auch Brandrückstände zu erwarten. Als konkrete Brandrückstände treten in der Regel auf:

- die eigentlichen Brandstoffreste in Form von nichtbrennbaren Rückständen (Aschen und Schlacken) und unverbranntem Brandstoff
- im Rauchgas mitgeführte unverbrannte Brandstoffanteile wie Ruß, Pyrolyseprodukte u. a. bzw. nichtbrennbare Rückstände in Form von feinkörnigen Aschen
- Rauchgase, die aus inerten Luftinhaltsstoffen, deren Zersetzungsprodukten sowie von teil- und volloxydierten Brandstoffanteilen bestehen

Vereinfacht betrachtet können sowohl die Entstehung von Brandrückständen als auch die auftretenden Mengen als eine Funktion des ursprünglichen Aggregatzustandes der Brandstoffe angesehen werden, d. h. bei Bränden fester Stoffe sind somit fast immer Rückstände zu erwarten, bei Flüssigkeiten seltener, bei Gasen fast nie.

Durch das Ablöschen der brennenden Stoffe vor deren vollständiger Verbrennung erhöht sich die Wahrscheinlichkeit des Auffindens von Brandstoffrückständen. Somit bewegt sich das Spektrum der Rückstandsstoffe zwischen Ausgangsstoff über Restkohlenstoff bis hin zu den nichtbrennbaren Inhaltsstoffen. Auf die Besonderheit der Brandrückstände soll aber an dieser Stelle nicht weiter eingegangen werden (siehe auch Punkt 1.5.8.2).

1.4 Zündbereitschaft, Brennbarkeit und Brandverhalten der Stoffe

1.4.1 Zündbereitschaft brennbarer Stoffe

Unter dem Begriff **Zündbereitschaft**, auch **Entzündlichkeit** oder **Entzündbarkeit**, wird im Allgemeinen die Eigenschaft eines Stoffes bezüglich der Möglichkeit seiner Zündung durch eine Zündquelle verstanden. Die Annahme, dass Stoffe bzw. Stoffgemische, mehr oder weniger leicht entzündet werden können, stellt vor allem auf den Sachverhalt Fremdzündung ab. Die Zündbereitschaft wird durch solche Parameter wie Zündgrenze, Flammpunkt, Zündtemperatur u. a. charakterisiert. Entscheidend sind auch Art und Ein-

wirkdauer der Zündquelle. Die Zündbereitschaft von Stoffen hängt sowohl von deren chemischen Eigenschaften als auch von den physikalischen Eigenschaften und von den Umgebungsbedingungen ab. Die Zündbereitschaft ist somit nur partiell eine Stoffeigenschaft, vielmehr beschreibt sie eine Systemeigenschaft, nämlich die des brennbaren Systems.

Folgende Parameter werden genannt:

- chemische Zusammensetzung der Materialien, u. a. Gehalt an Beimengungen
- Feuchtigkeitsgehalt
- Aggregatzustand
- Verteilungsgrad
- spezifische Wärme
- Dichte
- Wärmeleitfähigkeit
- Grad der thermische Vorbehandlung
- Konzentration an Oxydationsmittel bzw. Inertisierungsmittel (Atmosphäre)
- Ventilationsverhältnisse
- geometrische Anordnung
- Dispersionsgrad
- Katalysatorenwirkung

Oftmals genannte bautechnische Parameter sind der Verbund mit anderen Stoffen, der Einbauzustand und Behandlungen (Imprägnierungen) sowie Beschichtungen

Letztere gehen aber über die eingangs genannte Definition insofern hinaus, als damit auch Rahmenbedingungen für die Brennbarkeit und vor allem die Brandausbreitung im Sinne des bautechnischen Brandschutzes beschrieben werden.

Die **Zündbereitschaft** umfasst auch den Sachverhalt **Selbstentzündung**. Nach der zur Zündung erforderlichen **Mindestzündenergie** unterscheidet man in leicht und schwer entzündbare Stoffe. Im Zusammenhang mit den vorgenannten Stoffeigenschaften erscheint es an dieser Stelle hilfreich einige dieser Eigenschaften näher zu beschreiben, zumal sich daraus unmittelbare Zusammenhänge zu Kennzahlen der Zündbereitschaft ableiten.

Molmasse (molare Masse)

Die (absolute) Molmasse ist definiert als Masse pro Stoffmenge (in mol) bzw. ist die molare Masse (M) die Summe der Atommassen aller im Molekül vereinigten Atome in $\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$. Als Stoffkonstante besitzt die Molmasse eine entsprechende Bedeutung zur Wertung bestimmter sicherheitstechnischer Kennzahlen untereinander. Unter Einbeziehung der Molmasse

sind nachfolgende Berechnungen des Dampfdichteverhältnisses zu Luft und des Diffusionskoeffizienten möglich.

Molvolumen (molares Volumen)

Das Molvolumen oder molare Volumen eines Stoffes gibt an, welches Volumen ein Mol eines bestimmten Stoffes einnimmt.

Für Gase und Dämpfe und deren „Auftreten“ im Zusammenhang mit Zündung und Verbrennung besitzt auch das Molvolumen eine große Bedeutung. So lässt sich dieser Parameter für Gase u. a. aus der Gleichung für ideale Gase herleiten und ergibt sich aus dem Quotienten des Volumens V und der Stoffmenge n :

$$V_m = \frac{V}{n} = \frac{M}{\rho} = \frac{RT}{p} \quad (11)$$

dabei ist:

M - Molmassen g mol^{-1}

ρ - Dichte in g l^{-1}

R - Universelle Gaskonstante $8,314 \text{ in } \text{J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$

n - Stoffmenge in mol

T - absolute Temperatur in K

p - Druck in Pa (auch in $\text{kg s}^{-2} \text{ m}^{-1}$)

Das Molvolumen beschreibt also das Volumen, welches von insgesamt $6,022 \cdot 10^{23}$ Teilchen (Avogadrozahl) einer Substanz ausgefüllt wird. Das molare Volumen des idealen Gases beträgt $22,413996 \text{ l mol}^{-1}$ unter Normalbedingungen und $24,4640424 \text{ l mol}^{-1}$ bei chemischen Standardbedingungen (Normalbedingungen – Druck = 100 kPa und Temperatur $T = 298,15 \text{ K}$ und chemische Standardbedingungen – Druck = 100 kPa und Temperatur $T = 273,15 \text{ K}$ bzw. $0 \text{ }^\circ\text{C}$). Für reale Gase, Feststoffe und Flüssigkeiten ist das molare Volumen hingegen stoffabhängig. Für Deutschland gilt entsprechend DIN 1343 für das molare Normvolumen = $22,414 \text{ l mol}^{-1}$ mit einer Toleranz von $1,9 \cdot 10^{-4} \text{ l mol}^{-1}$ bei Normalbedingungen.

Dichte

Die Dichte (ρ) ist der Quotient aus der Masse eines Körpers und seinem Volumen in kg m^{-3} , also Dichte (ρ) = Masse (m) in kg / Volumen (V) in m^3 .

Bei der Verwendung von Dichteangaben aus Tabellen ist zu beachten, dass sich das Volumen der Flüssigkeiten und der festen Stoffe mit steigender Temperatur ausdehnt und mit fallender Temperatur verringert (Beachte – Besonderheit Anomalie des Wassers). Deshalb ist die Temperaturangabe, bei der die Dichte gemessen wurde, unerlässlich.

lich. Grundsätzlich kann davon ausgegangen werden, wenn in Tabellen keine Temperatur angegeben wird, dass die Bestimmung der Dichte bei Normaltemperatur von 20 °C vorgenommen worden ist.

Die Dichte von Flüssigkeiten und festen Stoffen ist nur sehr unwesentlich vom Druck abhängig (Inkompressibilität). Bei Flüssigkeiten und festen Stoffen bezieht sich die Dichte auf 20 °C und einen Umgebungsdruck von 101,3 kPa. Sie gilt bei Stoffen mit einem Schmelzpunkt < 20 °C für die flüssige Phase und bei Stoffen mit einem Schmelzpunkt > 20 °C für die feste Phase.

Bei Flüssiggasen ($t_{\text{krit.}} > 20 \text{ °C}$) wird neben der Flüssigkeitsdichte im Sättigungszustand der bei 20 °C herrschende absolute Dampfdruck in MPa angegeben.

Bei verdichteten Gasen ($t_{\text{krit.}} < -10 \text{ °C}$) wird meist auf die Angabe der Dichte der flüssigen Phase verzichtet.

So wie bei Gasen sind auch bei Flüssigkeitsdämpfen die starken Dichteänderungen in Abhängigkeit von der Temperatur zu beachten. Brennbare Gase und Dämpfe sind im Allgemeinen immer schwerer als Luft, das lässt sich über den Vergleich der Molmasse von Luft (Mittlere Molmasse = 28,96) und der zu betrachtenden Substanz leicht ermitteln. Eine Ausnahme bilden Gase mit einer Dichte kleiner als Luft wie z. B. Acetylen, Cyanwasserstoff, Ethylen, Kohlenmonoxid, Methan und Wasserstoff.

Unter Dichtezahl (d) versteht man das Verhältnis von Dichte eines Stoffes bei 20 °C zur Dichte des Wassers bei 4 °C = D_4^{20}

Dampfdichteverhältnis

Unter Dampfdichteverhältnis oder relativer Dampfdichte φ wird das Verhältnis der Masse des definierten Volumens eines reinen Gases und/oder Dampfes eines Stoffes m_D zur Masse des definierten Volumens der Luft m_L beim gleichen Zustand (p, T) verstanden.

$$\varphi = \frac{m_D}{m_L} \quad (12)$$

Das Dampfdichteverhältnis für Luft beträgt 1 bei 20 °C. Daraus folgt, dass bei Dampfdichtewerten für Gase oder Dämpfe >1 diese auf den Boden bzw. auf Wasseroberflächen absinken, sich über weite Strecken ausbreiten oder in tiefer liegende Räume eindringen können. Damit sind u. a. Rückzündungen über große Entfernungen möglich. Liegen die Werte <1 bedeutet dies, dass die Dämpfe oder Gase aufsteigen.

In der verfahrenstechnischen Literatur wird ausgeführt, dass bei Stoffen mit einem Dampfdichteverhältnis zwischen 0,8 und 1,1 ein Verbleiben im Schwebezustand bzw. ein Absinken erwartet werden kann, sofern kein Auftrieb durch Wärme entsteht. Stoffe mit einem Dampfdichteverhältnis > 1,1 werden als *schwere* Stoffe bezeichnet. Sie besitzen eine Tendenz zum Absinken. Stoffe mit einem Dampfdichteverhältnis < 0,8 werden als *leichte* Stoffe bezeichnet, weil sie eine Tendenz zum spontanen Aufsteigen besitzen. In den Tabellen 3 und 6 der Tabellenanlage sind Dichten und relative Dampfdichten

häufig vorkommender Gase und Dämpfe zusammengefasst. So ergibt sich beispielsweise, ausgehend von der Molmasse von Toluol mit $92,1 \text{ g mol}^{-1}$ und der von Luft (entsprechend der üblichen Zusammensetzung $28,96 \text{ g mol}^{-1}$), eine relative Dichte für Toluoldampf von 3,18 (Luft = 1). Unter Berücksichtigung einer Satttdampf-Konzentration von 2,9 Vol.-% eines Toluol-Luft-Gemisches bei $20 \text{ }^\circ\text{C}$ ist dieses aber nur maximal 1,06-mal schwerer als Luft. Dabei gilt: $(100 - 2,9 + 2,9 \cdot 3,18)/100 = 1,06$

Grundsätzlich kann festgestellt werden:

- Eine Entmischung eines Dampf-Luft-Gemisches aufgrund der unterschiedlichen Dichten der Dämpfe und der Luft findet nicht statt.
- Eine Vermischung mit Luft vollzieht sich in einer unbewegten Atmosphäre langsamer im Vergleich zu bewegter Luft. Bereits geringe Luftbewegungen (natürlicher Zug, Umhergehen von Personen, thermisch bedingte Konvektion) können die Vermischung mit Luft erheblich beschleunigen.
- In ruhender Luft breiten sich die Dämpfe brennbarer Flüssigkeiten umso besser in Bodennähe aus (fließen), je größer deren Dampfdichte ist.

Diffusionskoeffizient

Diffusion ist ein Transportvorgang von Stoffen, indem sich ein Ausgleich eines Konzentrationsunterschiedes von u. a. gasförmigen Stoffen vollzieht. Bei diesem Vorgang bewegen sich die Teilchen im statistischen Mittel durch Brownsche Molekularbewegung temperaturabhängig von Bereichen höherer zu solchen mit einer niedrigeren Konzentration. Die Diffusion ist passiv und unspezifisch, d. h. einzelne Teilchen bewegen sich zufällig und ungerichtet. Sind in einem Raum Teilchen oder Energie ungleichmäßig verteilt, dann führt die thermisch bedingte Bewegung der Teilchen mit der Zeit dazu, dass sie in diesem Raum statistisch gleichmäßig verteilt sind, ihre Konzentration also an jedem Messpunkt im Raum gleich hoch ist. Aufgrund eines Konzentrationsgefälles besteht ein Nettofluss an Teilchen, bis sich ein stationärer Zustand, das Gleichgewicht, einstellt. Dies kann dazu führen, dass bei freiwerdenden Gasen und Dämpfen sich mit der Zeit in konkreter Abhängigkeit von Druck und Temperatur zündwillige aber auch unkritische Gas- und/oder Dampf-Luftgemische bilden können. Die Maßgröße für diesen Prozess ist der Diffusionskoeffizient. Der Diffusionskoeffizient (oder die Diffusionskonstante) beschreibt grundsätzlich den thermisch bedingten Transport von Materie eines Stoffes aufgrund der zufälligen Bewegung der Teilchen. Bei der Materie kann es sich u. a. um Moleküle eines Gases handeln. Der Diffusionskoeffizient ist daher ein Maß für die Beweglichkeit der Teilchen und lässt sich aus der in einer bestimmten Zeit zurückgelegten Wegstrecke ermitteln (Maßeinheit $\text{m}^2 \text{ s}^{-1}$). Die Diffusionsgeschwindigkeit von Gasen ist von der Molmasse dieser Gase abhängig, d. h. Gase mit geringerer Molmasse breiten sich schneller aus als solche, die eine größere Molmasse haben.

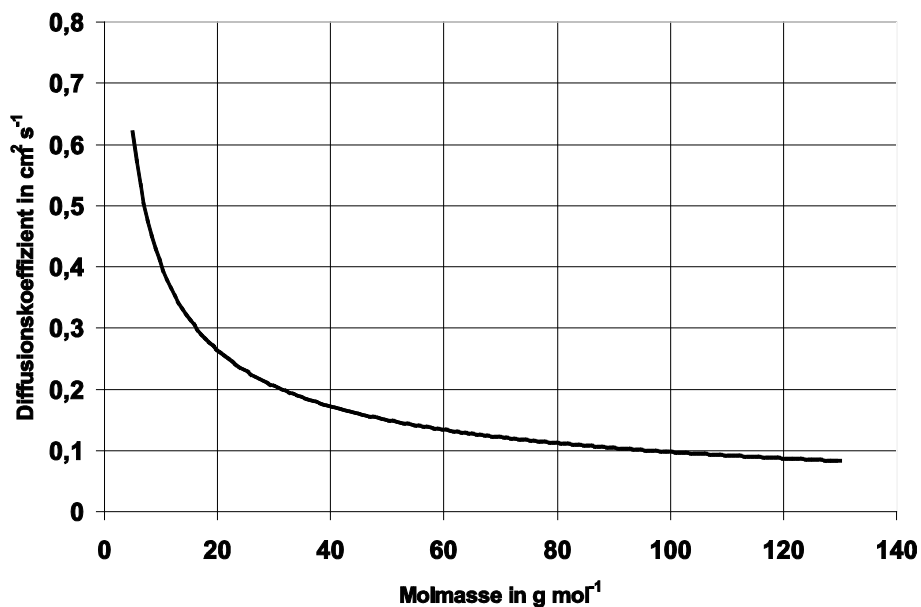


Abb. 15: Zusammenhang zwischen Diffusionskoeffizient und Molmasse

Eine überschlägige Abschätzung der Diffusionskoeffizienten von Gasen und Dämpfen ist möglich, weil die Wurzel der Molmasse (M) in einem annähernd umgekehrt proportionalen Verhältnis zum Diffusionskoeffizienten (D) steht.

$$\sqrt{M} = \frac{1}{D} \quad (13)$$

Diese Proportionalität drücken auch die Kurvenverläufe der Abbildungen 15 und 16 aus. So gilt z. B. für Kohlenwasserstoffe:

$$D = \frac{0,765}{\sqrt{M}} \quad (14)$$

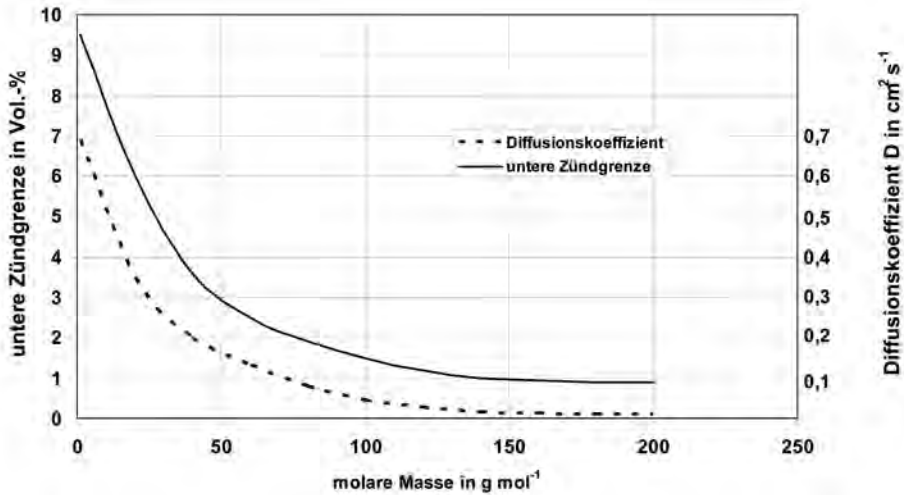


Abb. 16: Beziehung zwischen der Molmasse, der unteren Zündgrenze und dem Diffusionskoeffizienten am Beispiel von aliphatischen Kohlenwasserstoffen

Der Begriff Verdunstung steht für den Übergang einer Flüssigkeit in die Dampfphase bei einer Temperatur, die niedriger als die Siedetemperatur ist. Er beschreibt, dass die Flüssigkeitsmoleküle ständig durch die Flüssigkeitsoberfläche in den umgebenden Gasraum entweichen (*Verdampfung*). Da sich in Abhängigkeit von Temperatur und Druck ein Gleichgewicht zwischen Dampf- und Flüssigphase einstellt, kehren einige Dampfmo­leküle auch in die Flüssigkeit zurück (*Kondensation*). In einem abgeschlossenen System (Behälter mit Flüssigkeit) stellt sich ein Gleichgewicht zwischen Verdunstung (Verdampfung) und Kondensation ein. Die im Dampfraum befindlichen Moleküle besitzen einen entsprechenden Energieinhalt, der sich in einer Druckwirkung gegenüber der Behälterwand darstellt. Dies ist der Dampfdruck. Jede Flüssigkeit besitzt einen charakteristischen, von der Temperatur abhängigen Dampfdruck. Jede Flüssigkeit verdunstet aber auch mit einer individuellen Geschwindigkeit. In Hinblick auf eine Abschätzung der Neigung zur Verdunstung wurde die Verdunstungszahl eingeführt.

Die Verdunstungszahl ist eine Maßzahl für die Flüchtigkeit von Flüssigkeiten, die für die Beurteilung von Löse-, Verdünnungs- und Verschnittmitteln von Bedeutung ist. Als Verdunstungszahl wird dabei das Verhältnis aus der gemessenen Verdunstungszeit einer zu prüfenden Flüssigkeit zur Verdunstungszeit von Diethylether (wird gemäß Definition = 1 gesetzt) angegeben.

Sie drückt aus, um wie viel Mal langsamer eine beliebige Flüssigkeit im Vergleich zu Diethylether verdunstet. Die Verdunstungszahl wird nach DIN 53 170 bestimmt. Die Verdunstungszahl gestattet somit eine Abschätzung, mit welcher Geschwindigkeit sich über einer freien Flüssigkeitsoberfläche eine zündfähige Atmosphäre bilden kann. Mit größer werdender Verdunstungszahl nimmt das Risiko des Entstehens einer zündfähigen Atmosphäre ab.

Die Verdunstungszahl ermöglicht eine mengenmäßige Abschätzung der verdunsteten Flüssigkeit. Oberhalb des Flüssigkeitsspiegels stellt sich eine Dampfsättigungskonzentration C_s ein, die sich bis zu einer Höhe h auf $C = 0$ abbaut. In der Atmosphäre bilden die Schwerkraft und die Temperatur die Begrenzung des Volumens (Ausdehnung, besser räumliche Ausbreitung) des brennbaren Systems, wobei der Flüssigkeitsdampf mit dem Oxidationsmittel Luft unmittelbar ein brennbares System (brennbares Gemisch) bilden kann.

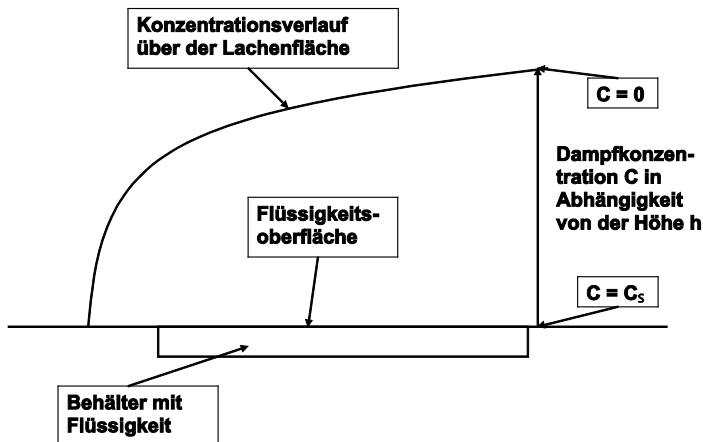


Abb. 17: Konzentrationsverteilung über einer Flüssigkeitslache – schematisch

Nachfolgend wird auf Möglichkeiten der Berechnung zündwirksamer und damit verbrennungswirksamer Zustände in der Dampfphase über brennbaren Flüssigkeiten eingegangen. Die aufgeführten Sachverhalte sind sowohl in Hinblick auf eine mögliche Explosionsgefährdung (siehe auch Punkt 4.7) als auch auf sich einstellende Verbrennungsvorgänge von Bedeutung.

Berechnungsmöglichkeiten zur Konzentrationsverteilung in Luft

Stofftransport in unbewegter Luft [1.9]

Für die Dampfsättigungskonzentration gilt unter Bezug auf das Daltonsche Gesetz: Der Partialdruck des gesättigten Flüssigkeitsdampfes ist gleich dem Produkt aus Konzentration des Dampf-Luft-Gemisches mal Gesamtdruck des Dampf-Luft-Gemisches.

$$C_{Sätt} = \frac{P_{D,Sätt}}{P_{Umg}} \cdot 100 \quad (15)$$

Für den Abstand von der Verdampfungsoberfläche bis zur Höhe einer Nullkonzentration gilt näherungsweise:

$$h_D = \left[\frac{12 \cdot D \cdot \tau}{1 - C_{Sätt}} \right]^{0,43} \quad (16)$$

Die Höhe des explosionsgefährlichen Konzentrationsbereiches errechnet sich wie folgt:

$$h_{D,x} = h_D \left[1 - \sqrt{\frac{0,5 \cdot C_{UEG}}{C_{Sätt}}} \right] \quad (17)$$

$$m_{Fl} = 2C_S \cdot \rho_D \cdot A_{Lache} \sqrt{\frac{D \cdot \tau}{3(1 - C_S)}} \quad (18)$$

Berechnung des Ausbreitungsradius r_a der Schwadenwolke mit $C \geq C_{UEG}$ unter Annahme von $\varphi \geq 1,5$, Windstille und dem Vorhandensein einer ebenen Fläche

$$r_A = \frac{C_{Sätt} \cdot A_{Lache} \cdot \varphi^2 \cdot \tau}{C_{UEG} \cdot h_D \cdot 4,2 \cdot 10^3} \quad (19)$$

A_{Lache} - Lachenfläche in m^2

$C_{Sätt}$ - Sättigungskonzentration in Vol.-%

C_h - Konzentration in der Höhe h in Vol.-%

C_{UEG} - untere Zündgrenze Konzentration in Vol.-%

h_D - Höhe der Nullkonzentration in m

$h_{D,x}$ - Höhe der explosionsgefährlichen Konzentration in m

r_a - Ausbreitungsradius am Boden in m

τ - Zeit in s

D - Diffusionskoeffizient in $m^2 s^{-1}$

$\rho_{D,Sätt}$ - Sättigungsdampfdruck in Pa

ρ_{Umg} - Umgebungsdruck in Pa

φ - Relative Dampfdichte zu Luft

ρ_D - Dichte des Dampfes in $kg m^{-3}$

Stofftransport in bewegter Luft [1.9]

$$\dot{m}_{Fl} = K_x \cdot A_{Lache} \cdot F_m \cdot \tau \quad (20)$$

oder in Form des empirischen Ansatzes

$$\dot{m}_{Fl} = M \cdot p_0 \cdot A_{Lache} (0,352 + 0,786 w) \cdot 10^3 \quad (21)$$

Für ein explosionsgefährliches Dampf-Luft-Volumen gilt:

$$V_L = \frac{\dot{m}_{Fl} \cdot \tau}{0,5C_{UEG}} \quad (22)$$

Für die Zeitdauer der Ausbildung eines explosionsgefährlichen Dampf-Luft-Gemisches in einem Raum gilt:

$$\tau = \frac{0,5C_{UEG} \cdot V_R}{\dot{m}_{Fl}} \quad (23)$$

\dot{m}_{Fl} - Massenstrom verdampfter Flüssigkeit in kg h^{-1}

M - Molmasse der Flüssigkeit in g mol^{-1}

A_{Lache} - Lachenfläche in m^2

C_{UEG} - untere Zündgrenze Konzentration in Raumteilen

τ - Zeit in s

$p_{D,Sätt}$ - Sättigungsdampfdruck in Pa

K_x - Koeffizient der Masseübertragung in $\text{kg m}^{-2} \text{h}^{-1}$

F_m - mittlere Bewegungskraft der Masseübertragung ($F_m = p_0 / 6 \times 1013,25$, wobei p_0 der Dampfdruck bei der Verdampfungstemperatur in hPa ist)

V_R - Raumvolumen mit explosionsgefährlicher Konzentration in m^3

V_L - Luftvolumen mit explosionsgefährlicher Konzentration in m^3

Die Berechnung des Koeffizienten der Masseübertragung K_x erfolgt mit Hilfe von Kriterien bezogener (kriterieller) Abhängigkeiten in nachfolgender Form [1.9]:

$$Nu_G^* = A \cdot Re_G^n (Pr^*)_{G}^{0,33} Gu^{0,135} \quad (24), \text{ wobei}$$

Nu - Nusselt-Zahl

Re - Reynolds-Zahl

Pr - Prantl-Zahl

Gu - Guchmann-Zahl

* - bedeutet Diffusionscharakter

G - steht für Gasphase

Wie schon durch die Verdunstungszahl ausgedrückt, kann auch der Dampfdruck einer Flüssigkeit bei 20 °C als Maß für deren Flüchtigkeit bei Raumtemperatur dienen. Die Abhängigkeit des Dampfdrucks einer Flüssigkeit von der Temperatur lässt sich durch die Dampfdruckkurve darstellen.

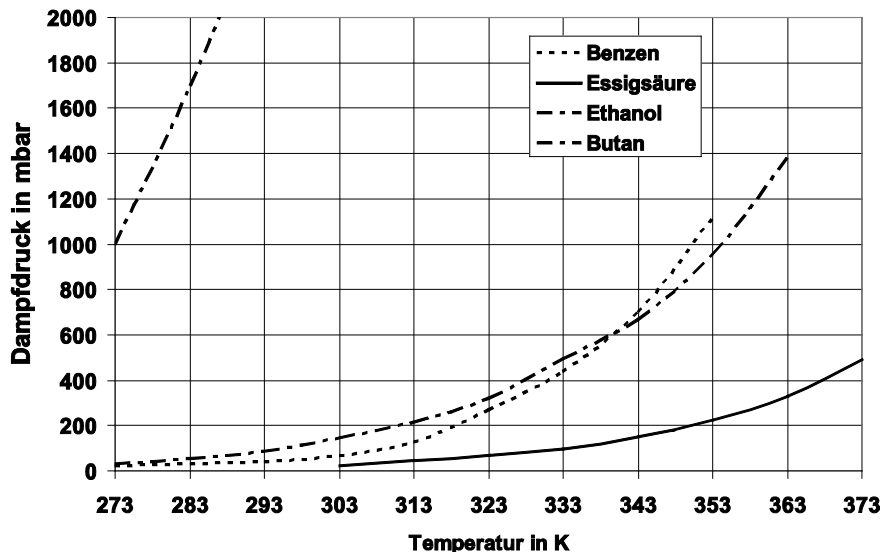


Abb. 18: Dampfdruck ausgewählter Flüssigkeiten als Funktion der Temperatur

Siedepunkt

Der Siedepunkt, auch Kochpunkt genannt, ist die Temperatur, bei der eine Flüssigkeit siedet. Unter dem normalen **Siedepunkt**, dieser wird in Tabellen und Nachschlagewerken am häufigsten genannt, versteht man die Temperatur, bei der der Dampfdruck einer Flüssigkeit den Normdruck 101,3 kPa erreicht. Beziehen sich Angaben auf einen anderen Dampfdruck, sind die Randbedingungen für dessen Bestimmung zu beachten. Für die Temperatur, bei der der Übergang von der Dampfform in die flüssige Zustandsform erfolgt, steht der Begriff **Kondensationspunkt**. Siedepunkt und Kondensationspunkt weisen bei reinen Stoffen unter gleichen Randbedingungen ermittelt identische Werte auf. Darüber hinaus gibt es Stoffe, die unter Normaldruckbedingungen den Übergang von der festen Phase in die Flüssigphase überspringen und sofort gasförmig werden. Diesen Phasenübergang nennt man Sublimation. Ebenso kann sich ein Stoff vor dem Erreichen des Siedepunktes zersetzen. Technische Gemische (z. B. Vergaserkraftstoff, Erdöl u. a.) haben keinen bestimmten Siedepunkt, sondern einen Siedebereich, der durch die Temperaturen am Siedebeginn und am Siedeende begrenzt ist (Siedegrenzen).

Flüssigkeiten mit einem niedrigen Siedepunkt (z. B. Aceton, Diethylether, Pentan) haben bei 20 °C einen hohen Dampfdruck, Flüssigkeiten mit einem hohen Siedepunkt haben einen niedrigen Dampfdruck. Spätestens aber mit Erreichen des Siedepunktes der Flüssigkeit wird Dampf in einem hohen Maße gebildet, denn hier entspricht der Dampfdruck der Flüssigkeit dem atmosphärischen Luftdruck. Oberhalb ihres Siedepunktes kann eine Kondensation nicht mehr möglich, d. h. eine Phasenkoexistenz gibt es nicht mehr. Ist der Siedepunkt eines Stoffes im Sinne des Reinstoffes bekannt, sind Aussagen über den Reinheitsgrad des Stoffes möglich. Im Reinstoff gelöste Beimengungen führen zu einer Siedepunktserhöhung. Eine Absenkung des Umgebungsdruckes führt zu einer Siedepunktserniedrigung. So sinkt der Siedepunkt einer Flüssigkeit um ca. 15 Kelvin, wenn sich der äußere Druck jeweils um die Hälfte verringert. Eine Druckerniedrigung von 101,3 kPa auf 2,658 kPa ergibt bei normal hochsiedenden Substanzen eine Siedepunktserniedrigung von ca. 100 Kelvin. Bei Herabsetzung des Siedepunktes um 10 Kelvin gegenüber dem Wert des reinen Stoffes verringern sich annähernd auch der Flammpunkt und der untere Explosionspunkt um 10 Kelvin. Mittels einer überschlägigen Bewertung der Siedepunkte bzw. der Siedegrenzen bekannter Stoffe unter Einbeziehung der relevanten sicherheitstechnischen Kennzahlen ist es möglich, Abschätzungen zu möglichen sicherheitstechnischen Kennzahlen von nicht näher charakterisierten Stoffen vornehmen zu können. So ist es möglich, mittels Siedepunkt eines bekannten Stoffes Rückschlüsse auf den Flammpunkt zu ziehen, da der Siedepunkt, der Flammpunkt und die Verdunstungszahl in dem nachfolgend dargestellten funktionellen Zusammenhang stehen.

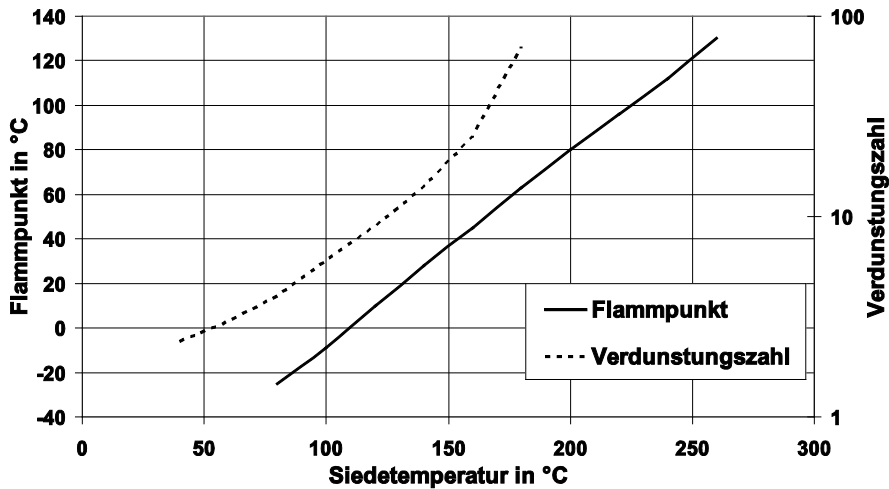


Abb. 19: Beziehungen zwischen Verdunstungszahl, Flammpunkt und Siedepunkt

Je niedriger der Siedepunkt einer brennbaren Flüssigkeit ist, umso gefährlicher ist sie im Sinne ihres Zündverhaltens. Der Siedepunkt lässt sich für jeden Druck aus der Dampfdruckkurve ablesen. Fällt der äußere Druck, sinkt auch der Siedepunkt.

Die für die Verdampfung aufgewandte Wärme wird als Verdampfungswärme bezeichnet.

1.4.2 Kennzahlen der Zündbereitschaft

Zur Beurteilung der Zündbereitschaft werden solche Kenngrößen wie Flammpunkt, oberer bzw. unterer Explosionspunkt, Zündtemperatur, Zündgrenzen, Selbsterwärmungstemperatur, Selbstentzündungstemperatur, Mindestzündenergie herangezogen.

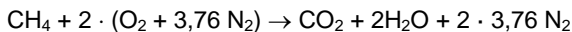
Neben einer Bewertung der Zündbereitschaft auf der Grundlage der vorgenannten Kennzahlen und der diesen zugrunde liegenden Bestimmungsmethoden erfolgt eine begriffliche Einteilung der Zündbereitschaft u. a. auch nach dem Gefahrstoffrecht:

- explosionsgefährlich
- brandfördernd
- hochentzündlich
- leicht entzündlich
- entzündlich

In diesem Zusammenhang geht es somit ausschließlich um eine Einstufung von Stoffen bzw. Stoffgemischen im chemischen Sinne und nicht um eine Bewertung des Entzündungsverhalten von Materialien und Baustoffen.

1.4.2.1 Stöchiometrisches Gemisch

Für Gemische von gas- oder staubförmigen Brennstoffen in Luft gibt es eine Gemischzusammensetzung, bei der Brennstoff und Luft genau in dem Verhältnis vorliegen, wie es die Reaktionsgleichung der vollständigen Verbrennung verlangt. Das ist das stöchiometrische Gemisch. So gilt für Methan (nahezu identisch mit Erdgas) bei vollständiger Verbrennung in Luft folgende Reaktion:



Unter Bezug auf das Molvolumen für Gase beträgt das Methanvolumen 22,4 l (1 mol), das Luftvolumen 213,25 l ($2 \cdot 4,76$ mol) und das Gemischvolumen somit 235,65 l im Normzustand. Für das stöchiometrische Gemisch von Methan in Luft ergibt sich ein Volumenanteil von 22,4 l in einem Gesamtvolumen von 235,65 l, d. h. der Gehalt beträgt 9,5 Vol.-%. Das stöchiometrische Gemisch beträgt bei vielen Stoffen das 2 bis 3-fache der unteren Zündgrenze. Da es bezüglich der Zündbereitschaft ein optimales Gemisch ist, d. h. weder Brennstoff noch Luft im Unter- oder Überschuss vorliegen, müsste es sich mit der geringsten Energie im Vergleich zu anderen Gemischen zünden lassen und auch am heftigsten reagieren (minimale Zündenergie, höchste Flammentemperatur, stärkster Explosionsdruck). Im Zusammenhang mit Schadensfällen ist ein solches Gemisch als das gefährlichste zu werten. Es ist aber aufgrund der Nichtrealisierbarkeit einiger notwendiger Randbedingungen für eine optimale Verbrennungsreaktion nur selten zu erreichen. Im Zusammenhang mit technischen Verbrennungsprozessen wird eine Annäherung an das stöchiometrische Gemisch angestrebt. Bei Schadensfällen kann eine solche Annäherung ungewollt erreicht werden (weiteres siehe Punkt 4.7).

1.4.2.2 Flammpunkt

Den Flammpunkt kann man als die wichtigste sicherheitstechnische Kennzahl zur Beurteilung der Zündbereitschaft der Dämpfe von brennbaren Flüssigkeiten gegenüber Flammen und Funken bezeichnen.

Der Flammpunkt ist die niedrigste Temperatur einer brennbaren Flüssigkeit, bei der sich unter Normbedingungen – bezogen auf einen Druck von 1013 mbar – aus der zu prüfenden Flüssigkeit Dämpfe in solcher Menge entwickeln, dass sich über dem Flüssigkeitsspiegel im Tiegel der Prüfapparatur ein durch Fremdzündung entflammbares Dampf/Luft-Gemisch bildet. Hat die brennbare Flüssigkeit eine Temperatur, die niedriger ist als der Flammpunkt, lässt sich die Flüssigkeit nicht mit einer Zündquelle entzünden. Erst wenn die Temperatur des Flammpunktes erreicht ist, bildet die Flüssigkeit in ausreichender Menge brennbare Dämpfe, welche sich dann entflammen lassen. Die nachströmende Dampfmenge ist jedoch nicht groß genug, um eine dauerhafte Verbrennung zu ermöglichen, wenn die Zündquelle wieder entfernt wird. Bei fallendem Luftdruck sinkt der Flammpunkt, da die erforderliche Dampfkonzentration aufgrund der vom Umgebungsdruck abhängigen Verdampfungsgeschwindigkeit schon bei geringerer Temperatur erreicht wird. Somit ist der Flammpunkt direkt abhängig vom Umgebungsdruck p und der Temperatur T der Flüssigkeit.

$$T_{Fl. pkt} = f(p, T) \quad (25)$$

Der Flammpunkt ist umso niedriger, je größer die temperaturabhängige Verdampfungsgeschwindigkeit der Flüssigkeit ist und je tiefer die **untere Zündgrenze** (siehe Explosionsgrenzen) des Dampf-Luft-Gemisches liegt.

Das Phänomen der Temperaturabhängigkeit des Flammpunktes lässt sich beispielsweise mit Dieselkraftstoff oder Heizöl demonstrieren, da beide Flüssigkeiten einen Flammpunkt von ca. 55 °C besitzen und sich nicht bei Zimmertemperatur mittels Zündholzflamme entflammen lassen. Wird das brennende Zündholz ausreichend lange in die Nähe der Flüssigkeit gebracht, erwärmt sich diese an der Oberfläche, so dass der Flammpunkt erreicht wird und eine Entzündung erfolgt.

Der Flammpunkt liegt meist nur wenige Kelvin unterhalb des Brennpunktes – weiteres siehe dort. Wird die Flüssigkeit weiter erhitzt, erreicht sie die Zündtemperatur (siehe Punkt 1.4.2.4).

Die Flammpunkte einiger Stoffe sind in Tabelle 35 im Tabellenanhang aufgeführt, wobei o. T. bzw. o. c. – offener Tiegel bzw. open cup, c. c. bzw. g. T. - closed cup bzw. geschlossener Tiegel bedeuten. Die o. c.-Werte liegen wegen der stärkeren Verdünnung der Dämpfe mit Luft meist 5 bis 20 Kelvin oberhalb der c. c.-Werte. Bei Flammpunktangaben ohne Zusatz handelt es sich in der Regel um c. c.-Werte.

Der Flammpunkt lässt sich mit folgenden Methoden zu bestimmen:

- a) Flüssigkeiten mit einem zu erwartenden Flammpunkt zwischen 5 und 50 °C – vorzugsweise nach Abel bzw. nach Abel-Pensky entsprechend Norm IP 170/70, IP 33/59 oder DIN 51 755
- b) Flüssigkeiten mit einem zu erwartenden Flammpunkt > 50 °C – vorzugsweise nach Pensky-Martens entsprechend Norm IP 34/71, D 93-73 ASTM oder DIN 51 758

Ausführung im Prinzip analog der Bestimmung des Flammpunktes im offenen Gefäß

- c) Weiterhin angewandt werden die Methoden nach Marcusson (Schmieröle) und die Methode nach Cleveland.

Flammpunkte unterhalb von -20 °C werden eher selten bestimmt. Daher wird der Flammpunkt mit < -20 °C angegeben.

Bei schwer entflammaren Flüssigkeiten, wie z. B. Dichlormethan, versagen die vorgenannten Methoden a) und b), weil sich keine zündfähige Dampfkonzentration ausbilden kann. Ein Lösungsweg besteht in der Berechnung des unteren Explosionspunktes (weiteres siehe Punkt 1.4.2.5) aus der Dampfdruckkurve. Der **untere Explosionspunkt** entspricht der Temperatur, bei der gerade 100 % der **unteren Explosionsgrenze (UEG)** erreicht sind. Die nach einem standardisierten Verfahren (siehe vor) ermittelten Flammpunkte liegen immer oberhalb des unteren Explosionspunktes, sie entsprechen einer Konzentration von etwa 120 bis 140 % UEG. Wird eine Flüssigkeit unter üblichen Umgebungsbedingungen auf oder über ihren Flammpunkt erwärmt (siehe Ausführungen zum Dampfdruck), so verdampft sie so stark, dass sich über dem Flüssigkeitsniveau ein

zündfähiges Dampf/Luft-Gemisch ausbilden kann. Das bedeutet aber auch, dass sich eine explosionsfähige Atmosphäre über einer Flüssigkeit bilden kann, deren Temperatur 5 Kelvin unter dem Flammpunkt liegt.

Die Feststellung, dass brennbare Flüssigkeiten aufgebracht auf poröse Stoffe, wie textile Materialien, poröse Feststoffe u. a. bei Temperaturen selbst unterhalb des Flammpunktes gezündet werden können und selbständig weiterbrennen, scheint von der eigentlichen Flammpunktdefinition nicht erfasst zu werden. Allein durch die entsprechende Oberflächenvergrößerung kommt es zu einer verstärkten Dampffreisetzung (Dochteffekt). Diese Feststellung gilt gleichermaßen für dispergierte Flüssigkeiten. Versprüht oder zerstäubt man eine brennbare Flüssigkeit, so kann dieses Flüssigkeitsaerosol durchaus gezündet werden, auch wenn die Temperatur der Flüssigkeit noch deutlich unter dem Flammpunkt liegt. Eine praktische Umsetzung dieses Phänomens erfolgt sowohl bei technischen Verbrennungsanlagen als auch bei Kraftmaschinen. So kann ein Heizöl mit einem Flammpunkt von über 50 °C zerstäubt in einem Brenner problemlos auch bei Normaltemperatur gezündet und verbrannt werden. Als technische Anwendung ist in diesem Zusammenhang der Zerstäubungsbrenner zu nennen. Änderungen im Entflammungsverhalten sind auch bei der Mischung zweier brennbarer Flüssigkeiten mit verschiedenen Flammpunkten zu erwarten. So nähert sich der Flammpunkt der Mischung nach Zugabe geringer Mengen einer Flüssigkeit mit niedrigerem Flammpunkt diesem an. Beispielsweise sinkt der Flammpunkt von Dieselmotorkraftstoff mit 55 °C bereits bei Zumischung von wenigen Vol.-% Vergasermotorkraftstoff auf unter 30 °C. Solche Mischungen können deshalb schon bei Raumtemperatur Dämpfe mit explosionsgefährlichen Konzentrationen freisetzen (hier: sogenannter selbst hergestellter Winterdiesel durch Zugabe von Ottomotorkraftstoff zu herkömmlichen Diesel). Handelsüblicher Winterdiesel ist eine Spezialrezeptur mit sogenannten Additiven, die das Ausfällen von Paraffinkristallen bei niedrigen Temperaturen verhindern.

Auf zwei weitere Sachverhalte gilt es hinzuweisen: So verringert sich die Höhe des Flammpunktes in erheblichem Maße, wenn die Bestimmung nicht in der üblichen Umgebungsluft, sondern in reinem Sauerstoff durchgeführt wird. Weiterhin werden bei der Bestimmung des Flammpunktes im geschlossenen Tiegel von schmelzbaren organischen Stoffen, die bei Raumtemperatur noch in fester Form vorliegen, Flammpunkte gefunden, die bedingt durch die sich mit ansteigender Temperatur ausbildende Dampfphase deutlich unter dem Schmelzpunkt der jeweiligen Substanz liegen. Bei mit Wasser mischbaren brennbaren Flüssigkeiten erhöht sich deren Flammpunkt bei einer stetig steigenden Zugabe von Wasser – siehe Tabelle 34 im Anhang. Man kann also derartige brennbare Flüssigkeiten durch Vermischen mit Wasser insoweit verändern, dass ein Entflammen nicht möglich ist (Löschen). Dennoch gilt es zu beachten: Wässrige Lösungen besitzen auch bei relativ hohem Wasseranteil noch einen Flammpunkt und sind somit brennbar. Beispielsweise besitzen Spirituosen mit einem Reinalkoholgehalt von 54 Vol % einen Flammpunkt von ca. 22 °C, während bei einem Gehalt von 33 Vol % der Flammpunkt ca. 30 °C beträgt, d. h. die Flammpunkte wässriger Lösungen brennbarer Flüssigkeiten sind abhängig von der Konzentration der brennbaren Flüssigkeit in der wässrigen Lösung.

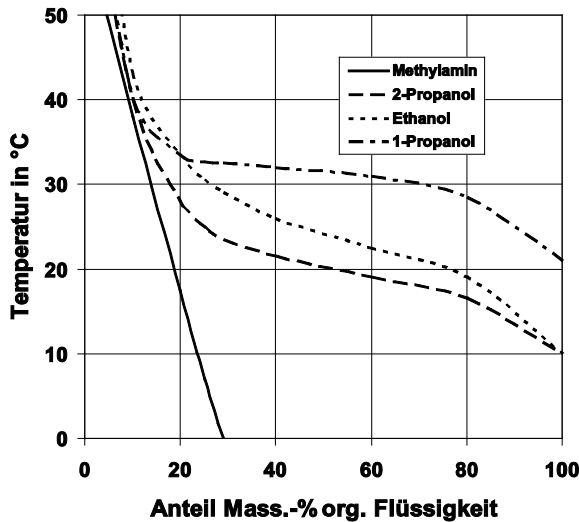


Abb. 20: Abhängigkeit des Flammpunktes wässriger Lösungen von der Konzentration

Bei der Bewertung der Flammpunkte von Wasser-Alkohol-Gemischen u. ä. sind die Gleichgewichtsdiagramme zwischen flüssiger und dampfförmiger Phase des Systems heranzuziehen. Da der Wasserdampf einen inertisierenden Einfluss auf das Zündverhalten hat, steigt der Flammpunkt bei geringen Alkoholkonzentrationen steil an. Bei ca. 65 °C tendiert er gegen Unendlich. Das bedeutet, infolge der zu hohen Wasserdampfkonzentration erfolgt keine Zündung. Bei Prüfmethode, bei welchen eine Gasflamme als Zündquelle zur Anwendung kommt, führt das häufig zum Verlöschen der Zündflamme, wenn diese bei ca. 60 °C bis 65 °C in den Dampfraum eintaucht.

Im Rahmen der EU-weiten Harmonisierung von Gesetzen und Richtlinien wurde mit Wirkung zum 1.1.2003 u. a. die Verordnung über brennbare Flüssigkeiten (VbF) aufgehoben. In der neuen Betriebssicherheitsverordnung (Verordnung über Sicherheit und Gesundheitsschutz bei der Bereitstellung von Arbeitsmitteln und deren Benutzung bei der Arbeit, über Sicherheit beim Betrieb überwachungsbedürftiger Anlagen und über die Organisation des betrieblichen Arbeitsschutzes – BetrSichV) wird u. a. der Betrieb von Systemen zur Gefahrstofflagerung geregelt. Neu geregelt ist deshalb auch die Anzeige- und Erlaubnispflicht. Nachfolgende Gegenüberstellung soll die Unterschiede hinsichtlich der Einstufung brennbarer Flüssigkeiten nach VbF und dem Gefahrstoffrecht/Betriebssicherheitsverordnung aufzeigen.

Bisherige Einstufung gemäß Verordnung über brennbare Flüssigkeiten (VbF)

Nach VbF sind brennbare Flüssigkeiten Stoffe mit Flammpunkt, die bei 35 °C weder fest noch salbenförmig sind, bei 50 °C einen Dampfdruck von 3 bar oder weniger haben und zu einer der nachstehenden Gefahrklassen gehören:

Tab. 7: Gegenüberstellung Gefahrklasse – Flammpunktbereich

Gefahrklasse	Flammpunktbereich
A I	Flüssigkeiten mit Flammpunkt (FP) < 21 °C
A II	Flüssigkeiten mit einem FP von 21 °C bis 55 °C
A III	Flüssigkeiten mit einem FP über 55 °C bis 100 °C
B	Flüssigkeiten mit einem FP < 21 °C, die sich bei 15 °C in Wasser lösen oder deren brennbare flüssige Bestandteile sich bei 15 °C in Wasser lösen

Tab. 8: Einstufung nach Gefahrstoffrecht (RL 67/548/EWG) für flüssige Stoffe, die der BetrSichV zu Grunde gelegt wird

Einstufung nach Gefahrstoffverordnung	Gefahrensymbol	R-Satz	Einstufungskriterien
Hochentzündlich	F+	R 12	flüssige Stoffe/Zubereitungen, mit FP < 0 °C und einem Siedepunkt (SP) von ≤ 35 °C
		R 11	leichtentzündlich: flüssige Stoffe/Zubereitungen mit FP < 21 °C (aber nicht hochentzündlich)
Leichtentzündlich	F	R 15	reagiert mit Wasser unter Bildung hochentzündlicher Gase: Stoffe/Zubereitungen, die bei Berührung mit Wasser/feuchter Luft hochentzündliche Gase in gefährlichen Mengen entwickeln (Mindestmenge 1 l/kg/h).
		R17	selbstentzündlich an der Luft: Stoffe und Zubereitungen, die sich bei gewöhnlicher Temperatur an der Luft ohne Energiezufuhr erhitzen und schließlich entzünden können.
entzündlich	–	R 10	flüssige Stoffe/Zubereitungen mit FP von mindestens 21 °C und höchstens 55 °C

Tab. 9: Gegenüberstellung der Bezeichnungen nach VbF/Gefahrstoffrecht

Bezeichnungen	
A I bzw. B	hochentzündlich oder leichtentzündlich
A II	Entzündlich
A III	–*

* Keine Bezeichnung, da von der Überwachungspflicht ausgenommen

Diese Einteilung bedeutet, dass die brennbaren Flüssigkeiten der Gefahrklassen A I und B jetzt als leicht- oder hochentzündlich und die der Gefahrklasse A II als entzündlich gelten. Nach der neuen BetrSichV werden ehemalige A III-Anlagen nicht mehr als überwachungsbedürftige Anlagen eingestuft.

1.4.2.3 Brennpunkt

Der Brennpunkt liegt meist nahe zum Flammpunkt, aber stets oberhalb. Der Brennpunkt einer brennbaren Flüssigkeit, gemessen in einem Flammpunktprüfer mit offenem Tiegel, repräsentiert die Temperatur, bei der die vorhandenen Dämpfe unter Normaldruck entzündet werden können und nach Entfernung der Zündquelle selbständig weiterbrennen. Dies sagt aus, dass beim Brennpunkt die brennbare Flüssigkeit eine höhere Temperatur aufweist als beim Flammpunkt. Am Brennpunkt ist die Verdampfungsgeschwindigkeit gleich oder größer als die Verbrennungsgeschwindigkeit. Die Temperaturunterschiede zwischen Flammpunkt und Brennpunkt nehmen mit steigendem Siedepunkt der jeweiligen brennbaren Flüssigkeit zu. Bei entsprechend niedrigen Flammpunkten kann diese gleich der Temperatur des Brennpunktes sein. Der Brennpunkt besitzt als sicherheitstechnische Kennzahl eine eher geringe Bedeutung.

Die Fähigkeit brennbarer Flüssigkeiten, sich in fein verteilter Form bzw. auf große Oberflächen verteilt bei niedrigeren Temperaturen unterhalb des Flammpunktes zünden zu lassen, gilt auch für den Brennpunkt.

1.4.2.4 Zündtemperatur

Allgemein ausgedrückt ist die Zündtemperatur (oder der Zündpunkt) die niedrigste, unter festgelegten Bedingungen ermittelte Temperatur, bei der sich brennbare Stoffe in Luft entzünden. Definitionsgemäß ist die Zündtemperatur einer zündfähigen Atmosphäre die bei der vorgeschriebenen Versuchsanordnung ermittelte niedrigste Temperatur einer erhitzten Wand, d. h. keine externe Zündquelle, an der die am leichtesten entzündbare explosionsfähige Atmosphäre gerade noch zum Brennen mit Flamme angeregt wird (DIN 14011). Diese Definition bezieht sich nur auf explosionsfähige Atmosphären, d. h. auf Gemische von gas- oder staub- bzw. nebelförmigen Stoffen mit Luft unter normalen atmosphärischen Bedingungen. Weiterhin gilt es festzustellen, dass die Zündtemperatur eine bedeutsame sicherheitstechnische Kennzahl sowohl für Gase, Flüssigkeiten (Dämpfe) und Feststoffe (Stäube) ist (siehe Tabellen 19, 23, 26, 27, 28, 29 und 34 – Anhang). Für kompakte feste Stoffe, bei denen die Zündung der Pyrolysegase gemessen wird, gibt es z. Zt. kein allgemein anerkanntes Verfahren zur Ermittlung der Zündtemperatur (thermische Selbstentzündung).

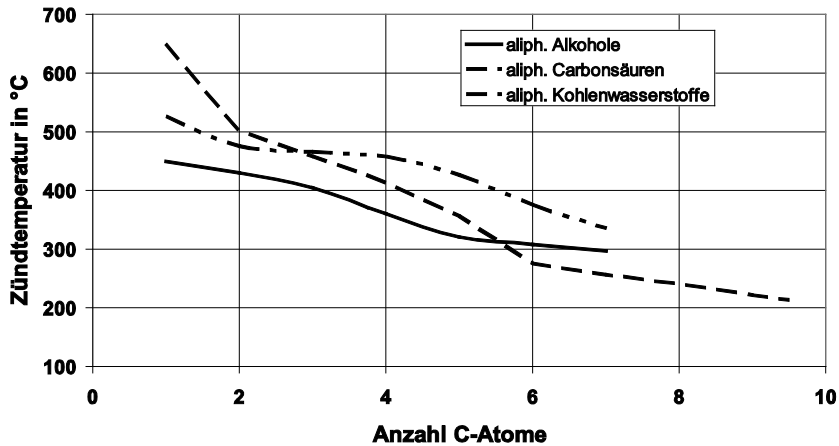


Abb. 21: Beziehung zwischen Zündtemperatur und Anzahl der C-Atome im Molekül des brennbaren Stoffes (Kettenlänge)

Die Zündtemperatur ist in starkem Maße von der Beschaffenheit der Oberflächen und dem Material dieser als Zündquelle fungierenden Oberfläche abhängig.

Die Zündgefährlichkeit von Gasen und verdampften Flüssigkeiten wird deshalb vor allem nach ihrer Zündtemperatur beurteilt. In diesem Zusammenhang werden für erhitzte Oberflächen in explosionsgefährdeten Bereichen maximale Temperaturen vorgegeben.

Gemäß DIN EN 60079-14 müssen elektrische Betriebsmittel so ausgewählt werden, dass ihre maximale Oberflächentemperatur nicht die Zündtemperatur eines möglicherweise vorhandenen Gases oder Dampfes erreichen kann (siehe auch **Temperaturklasse**).

Flammpunkt, Brennpunkt und Zündtemperatur sind als Kenngrößen für eine sicherheitstechnische Bewertung von brennbaren Flüssigkeiten von Bedeutung. Dies gilt in ähnlicher Weise für Schwelppunkt, die Entflammungs- sowie die Glimmtemperatur hinsichtlich einer Bewertung von lagernden Stäuben und kompakten Feststoffen. Bei diesen erfolgt im Gegensatz zum Flamm- und Brennpunkt die Zündung nicht z. B. durch eine offene Flamme als lokalisierte Zündquelle mit einer örtlich begrenzten (punktuellen) Energieeinwirkung. Feststoffe müssen auf ein für eine ausreichende Pyrolysegasfreisetzung notwendiges Temperaturniveau gebracht werden, damit diese nach Zündung selbständig weiterbrennen. Dies drückt sich in erheblich höheren Stofftemperaturen im Vergleich zu Flamm- und Brennpunkt aus.

Zur Bestimmung der Zündtemperatur werden z. B. bei Gas- oder Staub-Luft-Gemischen unterschiedliche Untersuchungsmethoden wie erhitzte Glasrohre oder Rohröfen eingesetzt. Die Zündtemperatur von Staubschichten (lagernder Staub) mit einer definierten Schichtdicke ermittelt man am häufigsten auf einer heißen Oberfläche. In diesem Zusammenhang ist auch auf eine Methode zu verweisen, die vom Grundaufbau der ASTM D 2155 oder ASTM E 659 entspricht. Die Proben werden in dem vorgenannten Gerät mit einer konstanten Aufheizungsgeschwindigkeit (linearer Anstieg) erhitzt. Die Luftzuführung

erfolgt selbstregulierend aus der Umgebung. Die Temperatur des Heizsystems als auch die in der Probe wird aufgezeichnet. Die im Probehälter (definierter Drahtnetzkuß) befindliche Probe wird durch die vorgenannte Temperaturführung des Ofens gleichmäßig erhitzt. Beim Erreichen der Zündtemperatur eines sich ausbildenden Gas-Luft-Gemisches entzündet sich dieses an der Wand des Gefäßes bzw. bei einer den Reaktionsbeginn innerhalb der Materialprobe charakterisierenden Temperatur des Gas-Luft-Gemisches. Als Kriterium für eine Zündung wird diejenige Ofentemperatur ermittelt, bei der die Proben-temperatur durch die ablaufende Selbsterhitzung 400 °C erreicht. Grundsätzlich gilt es festzustellen, dass die Zündtemperaturen von lagerndem Staub in der Regel unterhalb der von aufgewirbeltem Staub (schwebenden Staub-Luft-Gemisch) liegen (siehe Tabelle 20 im Anhang).

Anzumerken ist, dass insbesondere bei der Zündtemperatur, vor allem bei Feststoffen, die Versuchsbedingungen (Größe und Form von Apparatur und Stoffprobe, Anordnung und Zerteilungs- sowie Verteilungsgrad des Stoffes, Strömungsverhältnisse u. a.) sich nachhaltig auf das Ergebnis auswirken, deshalb besitzen Angaben in der Literatur ohne nähere Aussagen zur Bestimmungsmethode nur orientierende Bedeutung. Angegebene Zündtemperaturen treffen immer für das zündwilligste Stoff-Luft-Gemisch zu, bei dem die Zündtemperatur den kleinsten Wert aufweist. Nach den Zündtemperaturbereichen erfolgt entsprechend der EN 50014 Richtlinie 94/9/EG /ATEX 100a, Richtlinie 1999/92/EG, EN 50014 VDE 0170/0171 eine Einteilung der Gase und Dämpfe in Temperaturklassen (siehe Tabelle 20 im Anhang). Diese wiederum sind die Grundlage für sicherheitstechnisch höchstzulässige Oberflächentemperaturen von Anlagenteilen und elektrotechnischen Betriebsmitteln.

IEC (International Electrotechnical Commission), CENELEC u. a. haben sich für Gase und Dämpfe auf ein in der Norm IEC 60079-4 festgelegtes Verfahren zur Ermittlung der Zündtemperatur verständigt. Für Stäube ist das Bestimmungsverfahren der Zündtemperatur ebenfalls vereinheitlicht und in dem Dokument IEC 61241-2-1 festgeschrieben. Bei Stäuben wird unterschieden in die abgelagerte Form (Verfahren A) und in die aufgewirbelte Form (Verfahren B). Unter Berücksichtigung, dass unterschiedliche Zündtemperaturen gefunden werden, ergibt sich die zulässige Oberflächentemperatur für dem Staub zugängliche Teile der Systeme, Geräte und Komponenten, indem von dem nach A bestimmten Wert 75 Kelvin abgezogen werden und von dem nach B ermittelten Wert 2/3 errechnet werden. Der kleinere der beiden so ermittelten Werte stellt die zulässige Oberflächentemperatur der Betriebsmittel dar.

1.4.2.5 Explosionspunkte

Die Explosionspunkte (unterer Explosionspunkt – UEP und oberer Explosionspunkt – OEP) werden auch als Temperaturgrenzen der Zündung von Dampf-Luft-Gemischen bezeichnet. Die Explosionspunkte repräsentieren die Temperaturen, bei welchen die Konzentrationen des gesättigten Dampfes über einer brennbaren Flüssigkeit in einem abgeschlossenen Raum die untere bzw. obere Explosionsgrenze erreichen. Sättigung in diesem Zusammenhang bedeutet Gleichgewichtszustand zwischen Flüssig- und Dampfphase. Dies ist wie folgt zu beschreiben:

Ein teilweise mit einer brennbaren Flüssigkeit gefülltes Gefäß wird hermetisch verschlossen. Nach einer gewissen Zeit stellen sich in Abhängigkeit vom Siedeverhalten (Unterschied Siedepunkt – Niedrig- oder Hochsieder) und der Temperatur der Flüssigkeit ein bestimmter Dampfdruck und eine entsprechende Dampfkonzentration ein (siehe Dampfdruck, Verdampfung). Die sich nun ergebenden zwei Grenztemperaturen der Flüssigkeit, bei denen die Dampfkonzentration entweder die untere oder die obere Zündgrenze erreicht, sind die vorgenannten Explosionspunkte. Somit besitzen die Explosionspunkte vor allem eine Bedeutung im Zusammenhang mit der Ausbildung explosionsgefährlicher Dampf-Luft-Gemische in geschlossenen Behältern wie in Form von Chemieanlagen.

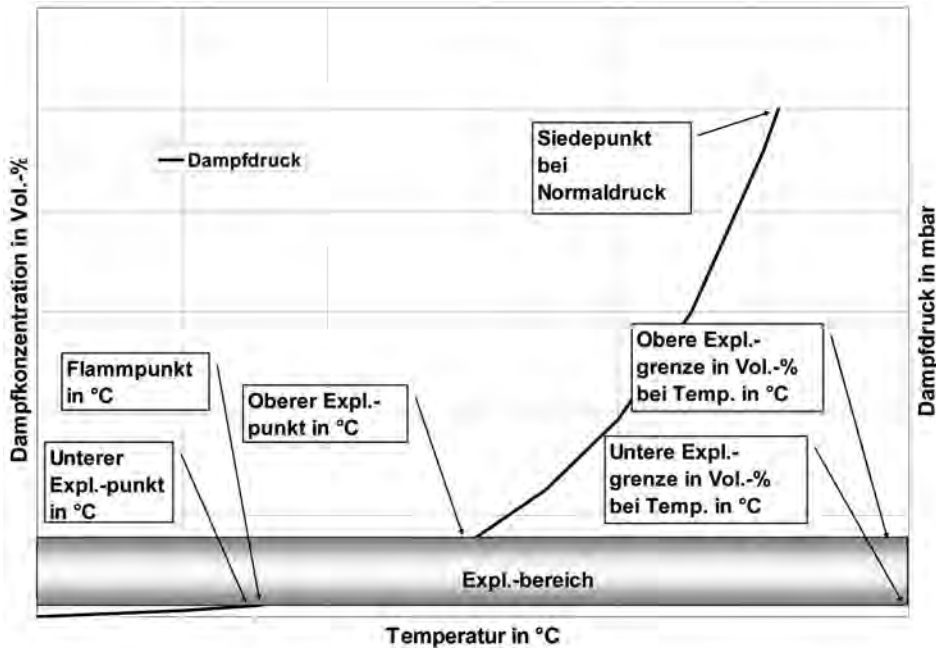


Abb. 22: Zusammenhang zwischen Explosionsgrenzen und Explosionspunkten – schematisch

Der untere Explosionspunkt liegt mit wenigen Ausnahmen immer unterhalb des Flamm- und Brennpunktes von Flüssigkeiten (siehe Tabelle 46 im Anhang). Als ungefährlich für die Bildung explosibler Dampf-Luft-Gemische in hermetisch verschlossenen Gefäßen gilt eine Flüssigkeitstemperatur von 10 Kelvin unterhalb des unteren Explosionspunktes. Der untere Explosionspunkt gestattet eine exaktere Festlegung der Explosionsgrenzen als der Flammpunkt. Aufgrund seiner aufwändigen Bestimmung wird dieser jedoch nur selten direkt gemessen. Meist erfolgt eine Abschätzung über den Flammpunkt. Liegt z. B. die maximale Verarbeitungstemperatur einer Flüssigkeit über dem unteren Explosionspunkt, so können sich explosionsfähige Dampf/ Luft-Gemische bilden. Im Falle des Versprühens (Dispergierung) von brennbaren Flüssigkeiten, ist, wie beim Flammpunkt beschrieben, auch bei Temperaturen unterhalb des unteren Explosionspunktes mit der Bildung eines explosionsfähigen Gemisches zu rechnen. Bei solchen Flüssigkeitsaero-

solen können sich explosionsgefährliche Eigenschaften herausbilden, die sich denen des entsprechenden Dampf/Luft-Gemisches annähern.

Wie schon im Zusammenhang mit dem Flammpunkt beschrieben, bewirken bestimmte Zusammensetzungen von Gemischen brennbarer Flüssigkeiten eine Absenkung der Temperaturgrenzen der Zündung. Bei Gemischen brennbarer Flüssigkeiten (technische Zubereitungen) hängen der obere Explosionspunkt bzw. der **Flammpunkt** (siehe Ausführungen zu Flammpunkterniedrigung) wesentlich von den Eigenschaften der niedrigsiedenden Gemischkomponente ab. Ist – wie z. B. bei den Kraftstoffen – die Konzentration der niedrigsiedenden Komponente in der Flüssigkeit gering, so nimmt sie während der Verdampfung schnell ab. Im gleichen Maße wird der Explosionspunkt erhöht.

Für den oberen Explosionspunkt von Gemischen gilt näherungsweise folgende Definition (Füll- oder h-Verhältnis):

$$h = \frac{\text{zu sättigendes Luftvolumen (Dampfraum)}}{\text{Flüssigkeitsvolumen}} \quad (26)$$

Ändert man z. B. den Füllstand in einem Behältnis mit Kraftstoff von $h = 1$ (zur Hälfte gefüllter Behälter) auf $h = 100$ (fast leerer Behälter) kann der obere Explosionspunkt um 20 Kelvin ansteigen. Liegt z. B. die maximale Verarbeitungstemperatur über dem unteren Explosionspunkt der Flüssigkeit, so entstehen in jedem Fall explosionsfähige Dampf-Luft-Gemische. Ist der jeweilige Explosionspunkt nicht bekannt, kann er wie folgt abgeschätzt werden:

- bei reinen, nicht halogenierten Flüssigkeiten 5 Kelvin unter dem Flammpunkt und
- bei Lösungsmittel-Gemischen ohne halogenierte Komponente 15 Kelvin unter dem Flammpunkt

1.4.2.6 Explosionsgrenzen

Die Explosionsgrenzen bzw. Zündgrenzen sind wichtige sicherheitstechnische Kennzahlen zur Beurteilung von Gas- und Dampf-Luftgemischen sowie Nebel (Flüssigkeitsaerosole in Luft) und Staub (Feststoffaerosole). In derartigen Mischungen mit Luft oder Sauerstoff kann sich deshalb nur innerhalb eines bestimmten Konzentrationsbereichs, d. h., zwischen **unterer Explosionsgrenze (UEG)** bzw. **oberer Explosionsgrenze (OEG)**, eine Zündung einstellen (**Explosionsbereich**). Die Explosionsgrenzen umfassen den Konzentrationsbereich des Brenngases in Mischung mit Luft, innerhalb dessen nach der Zündung eine sich selbständig fortpflanzende Reaktion eingeleitet werden kann. Die Explosionsgrenzen werden in speziellen Apparaturen ermittelt. Dabei werden mittels einer partiellen Änderung des Brennstoffanteils im Gemisch diejenigen Konzentrationen gesucht, bei denen nach der Einwirkung eines Zündfunken erstmalig oder letztmalig im gesamten Gemisch eine Reaktionsfortpflanzung mit Flammenercheinung und Druckaufbau erfolgt. Sie werden als Konzentration des brennbaren Gases, Dampfes oder Staubes in Vol.-%, in $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ oder in Mol-% bei Normbedingungen (101,3 kPa und 20 °C) angegeben – siehe Tabellen 22, 23 und 28 – Anhang. Beim Vergleich der Daten zu Explosionsgrenzen aus anderen Quellen ist zu beachten, dass sich diese bei Angaben in

g m^{-3} um den Faktor der zehnfachen Dampfdichte von den Angaben in Vol.-% unterscheiden, d. h. größer sind. Die Explosionsgrenzen werden darüber hinaus durch eine Reihe äußerer Faktoren nachhaltig beeinflusst. Dies können sein:

- Eine Absenkung des Ausgangsdruckes des Gemischs bewirkt eine Verkleinerung des Explosionsbereichs, wodurch Gemische nicht mehr gezündet werden können. So geht die Zündwilligkeit bei vielen Brennstoff-Luft-Gemischen im Bereich von 13 bis 67 mbar verloren.
- Hinsichtlich der Temperatur gilt die Annahme, dass bei einer Temperaturerhöhung um 100 Kelvin eine 8 bis 10 %-ige Erniedrigung der UEG und eine Erhöhung der OEG um 12 bis 15 % eintritt. Das kann dazu führen, dass bei Normaltemperatur zu magere bzw. zu fette Gemische zündwillig werden können.
- Bei Einsatz von O_2 statt Luft verschiebt sich die obere Explosionsgrenze zu höheren Werten. Das führt zu einer enormen Ausweitung der Explosionsbereiche.
- Bei Zugabe von Inertgasen verändert sich der Explosionsbereich (hier besteht eine Abhängigkeit von der Wärmekapazität). Am Beispiel Methan/ O_2 wurde folgende Reihung festgestellt: $\text{CCl}_4 > \text{CO}_2 > \text{H}_2\text{O} > \text{N}_2 > \text{He} > \text{Ar}$. So sinkt bei Erhöhung des Inertgasanteiles die OEG, was dazu führen kann, dass nur noch eine Zündgrenze festgestellt wird. Eine weitere Erhöhung des Inertgasanteiles unterdrückt eine Zündung, was bei der minimalen zündgefährlichen Sauerstoffkonzentration eintritt. Der hierfür verantwortliche Anteil an Inertgas ist die phlegmatisierende Mindestkonzentration.
- Hinsichtlich der Höhe der Zündenergie gilt, dass die Mindestzündenergie die Zündung nur bei einer bestimmten Konzentration gestattet. Mit wachsender Zündenergie erweitert sich der Explosionsbereich.

Weitere Einflüsse gehen von der Art der Zündquelle, dem Ort der Zündung sowie der Größe und der Form der Versuchsapparatur aus. Insbesondere der Einfluss der vorgenannten Randbedingungen und die Anwendung unterschiedlicher Bestimmungsmethoden führen dazu, dass sich die Messergebnisse stark unterscheiden. Deshalb wird im Zusammenhang mit Festlegungen zu sicherheitstechnischen Aspekten davon ausgegangen, dass das Vorliegen einer Explosionsgefahr mit hinreichender Sicherheit nur dann ausgeschlossen werden kann, wenn die Gas- bzw. Dampfkonzentrationen hinreichend weit vom Explosionsbereich, z. B. die Konzentration unterhalb von 50 % der UEG liegt (maximaler Anzeigebereich von entsprechenden Warn- und Messgeräten), entfernt sind.

Bei Staubaufwirbelungen ist die Festlegung der Explosionsgrenzen von brennbaren Stäuben insofern schwierig, weil der Explosionsbereich nicht nur von der Art des Stoffes, sondern ganz wesentlich auch von der Korngröße, der Kornform und Korngrößenverteilung abhängig ist. Somit sind Angaben über die Zündbereiche von Stäuben erheblich seltener zu finden. In grober Abschätzung bewegt sich der Explosionsbereich technischer Stäube etwa im Bereich von 20 g m^{-3} für die UEG und 6 kg m^{-3} für die OEG. Im Allgemeinen wird bei Stäuben nur die UEG bestimmt. Es gilt, die UEG ist die niedrigste

Staubkonzentration eines Gemisches, in dem sich nach dem Zünden eine von der Zündquelle unabhängige Flamme gerade nicht mehr fortpflanzen kann.

1.4.2.7 Glimmtemperatur

Aus sicherheitstechnischer Sicht wird die Glimmtemperatur als die niedrigste Temperatur einer heißen Oberfläche definiert, auf der eine Staubschicht von ca. 5 mm Dicke beginnt sich infolge der anlaufenden exothermen Reaktion zu entzünden und als Glimmbrand weiter zu brennen (Prüfverfahren – VDE 0170/171). Zur Ermittlung der maximal zulässigen Oberflächentemperatur z. B. einer Leuchte werden zur Festlegung von Präventionsmaßnahmen die Zünd- und Glimmtemperatur des eingesetzten Staubes herangezogen.

In diesem Sinne muss die Oberflächentemperatur mindestens 75 Kelvin unterhalb der Glimmtemperatur liegen und darf nicht größer als 2/3 der Zündtemperatur des auftretenden Staubes sein.

Allgemein betrachtet ist die Glimmtemperatur die niedrigste Temperatur, bei der das Glimmen von Stoffen wie Holz, Naturfasern oder Duroplasten infolge ihrer thermischen Zersetzung in Form des Glimmens der kohlenstoffreichen Rückstände festgestellt wird. Die Glimmtemperatur liegt immer unterhalb der Zündtemperatur. Die Ergebnisse werden sehr stark von der Untersuchungsmethodik beeinflusst. Auch Stoffe wie roter Phosphor oder Eisenstaub neigen zum Glimmen und besitzen somit eine Glimmtemperatur. Brennbare Stoffe, die beim Erhitzen schmelzen wie Schwefel, viele organische Stoffe oder thermoplastische Kunststoffe, haben keine Glimmtemperatur. Bei glimmenden und nicht in Form eines Flammenbrandes verbrennenden Stoffen kann man die Glimmtemperatur näherungsweise auch als die **Zündtemperatur des Glutbrandes** bezeichnen.

In diesem Zusammenhang ist zu beachten, dass bei Staubablagerungen mit übermäßigen Dicken (z. B. an der Oberseite des Betriebsmittels oder seitlich und unterhalb des Betriebsmittels bei vollständiger Überdeckung der Betriebsmittel durch eine Staubschicht) infolge eines sich ausbildenden Wärmestaus deutlich niedrigere Oberflächentemperaturen eine Zündung auslösen können.

1.4.2.8 Schwelppunkt

Der Schwelppunkt ist die niedrigste Temperatur, bei der eine feste Substanz Schwelgase abgibt, so dass die entstehenden Schwelgas/ Luft-Gemische durch Fremdzündung entflammt werden können (Prüfverfahren – siehe VDI 2263), d. h. werden entsprechend der Temperaturverhältnisse so viel Schwelgase freigesetzt, dass das Schwelgas-Luft-Gemisch die untere Zündgrenze erreicht, flammt es bei Einwirkung einer Zündflamme auf, ohne weiter zu brennen (Entflammungstemperatur – diese Kennzahl entspricht vergleichsweise dem Flammpunkt bei Flüssigkeiten). Entflammungstemperaturen befinden sich fast immer unterhalb der Zündtemperaturen und unterliegen je nach der Bestimmungsmethode z. T. großen Schwankungen. Die in der Regel brennbaren Schwelgas/ Luft-Gemische entstehen bei unvollständiger Verbrennung (Schwelbrand), bei thermischen Zersetzungsprozessen und auch infolge des Ausgasens flüchtiger Komponenten aus z. B. festen Stoffen. Die Bildungsgeschwindigkeit der Schwelgase nimmt mit stei-

gender Stofftemperatur zu, dadurch steigt die Schwelgaskonzentration in der Nähe der Feststoffoberfläche. Der Schwelpunkt wird üblicherweise bei der sicherheitstechnischen Bewertung von Stäuben bestimmt, kann aber auch für kompakte Feststoffe ermittelt werden. Er liegt oberhalb der eigentlichen Schweltemperatur, die den Beginn einer merklichen Zersetzung und Schwelgasfreisetzung beschreibt. Oberhalb des Schwelpunktes wird die Bildungsgeschwindigkeit von flüchtigen brennbaren Stoffen ab einer bestimmten Temperatur so groß, dass sich diese Gase durch eine Zündflamme, Funkenstrecke oder eine andere externe Zündquelle entzünden lassen und der Stoff danach selbständig weiterbrennt (siehe Punkt 1.4.2.3 – Brennpunkt)

1.4.2.9 Selbsterwärmungstemperatur

Als **Selbsterwärmung** bezeichnet man den Vorgang der Temperaturerhöhung am oder im brennbaren Stoff infolge des Ablaufens exothermer Prozesse. Die niedrigste Temperatur, bei der im brennbaren Stoff oder auf seiner Oberfläche erkennbare exotherme Vorgänge des Zerfalls oder der Oxydation (Autoxidation) beginnen, bezeichnet man als Selbsterwärmungstemperatur, auch Selbsterhitzungstemperatur. Die Selbsterwärmungstemperatur an sich ist nicht als Kennziffer zur Bewertung der Zündbereitschaft zu verstehen. Mit ihrer Hilfe lassen sich aber in gewissem Maße Trends in Richtung Selbstentzündung ableiten. Ursachen der Selbsterwärmung können **biologische, chemische und/oder physikalische Prozesse** sein. Die Wärmeproduktion auf biologischer Grundlage resultiert u. a. aus der Lebenstätigkeit von Pilzen und Bakterien (Mikroorganismen). Diese Vorgänge sind in erster Linie bei Stoffen pflanzlichen Ursprungs zu beobachten. Die Selbsterwärmung wird vor allem durch solche Faktoren beeinflusst wie die Menge der vorhandenen Mikroorganismen in biologischen Materialien, dem Feuchtigkeitsgehalt des Stoffes, seinen Lagerbedingungen, der Lagerzeit u. a. So kann davon ausgegangen werden, dass nach relativ kurzer Zeit, z. B. nach ca. 3 – 4 Wochen bei Erntegut, bestimmte Mikroorganismen wie die mesophilen Bakterien und Pilze (Arbeitsoptimum liegt bei ca. 40 °C) die leicht abbaubaren Substanzen wie Eiweiß und einfache Kohlenhydrate umsetzen. Unter anderem wird dabei Energie freigesetzt und die Temperatur steigt im Stoff sehr schnell bis auf 50 bis 70 °C. In diesem Temperaturbereich sterben die mesophilen Mikroorganismen ab und nun werden thermophile (= wärmeliebende) Pilzen und Bakterien aktiv. Auch bei deren Wirken wird wieder Energie freigesetzt und die Temperatur steigt weiter an, wobei Cellulose und Hemicellulose abgebaut werden. Steigen die Temperaturen auf mehr als 75 °C (348 K), wird davon ausgegangen, dass die thermophilen Mikroorganismen ebenfalls absterben. Für eine weitere Wärmeproduktion können physikalische Prozesse in Form von Adsorptionsvorgängen die Ursache sein. Bedeutsam ist in diesem Zusammenhang die Adsorption von Luftsauerstoff und Wasserdampf an der Oberfläche von reaktionsfähigen Feststoffen. So sind große äußere Oberflächen (Zerteilungsgrad) sowie große Teilchenzwischenräume (Zwischenkornvolumen) typisch für zerkleinerte Feststoffe und bestimmen somit die Adsorptionsfähigkeit eines Stoffes. Ist z. B. die adsorbierte Oxidationsmittelmenge (wie Luftsauerstoff) groß, wird ein Temperaturanstieg in dem exponierten Stoff zu beobachten sein. Dieses Sauerstoffangebot fördert aber auch den Beginn des Prozesses der Selbsterwärmung auf chemischer Grundlage. Chemisch bedingte Selbsterwärmungsvorgänge basieren vor allem auf exothermen Oxydationsprozessen, die z. B. an die Anwesenheit von Luftsauerstoff gebunden sind. In den meisten Fällen kann die Selbsterwärmungsneigung von Stoffen nur über die kombinierte Wirkung der beschriebenen Ursachen erklärt werden. Dadurch wird

eine exakte Aufklärung der zur Selbsterwärmung und letztendlich zur Selbstentzündung führenden Teilvorgänge und -reaktionen erschwert.

Eine besondere Erscheinungsform im Zuge der Selbsterwärmung spezieller Stoffe wie Getreide, Futtermittel pflanzlichen Ursprungs u. ä. ist die **Maillard-Reaktion**. So wird eine solche Reaktion z. B. für pflanzliche Produkte mit Gehalten an bestimmten Proteinen bzw. Aminosäuren in Verbindung mit reduzierenden Kohlehydraten bei höheren Temperaturen (ca. 100 °C) als eine räumliche Vernetzung der Proteine angenommen. Inwieweit diese Reaktion selbst im Weiteren eine Selbstentzündung forcieren kann, ist zwar nicht beschrieben aber auch nicht gänzlich auszuschließen. Gleiches gilt auch für Fermentationsprozesse.

Auf Grund dieser nur qualitativ beschreibbaren Prozesse der Selbsterwärmung ist eine rein rechnerische Bewertung von derartigen Vorgängen auf direktem Wege kaum möglich. Als wesentliche Sachverhalte sind hierbei zu nennen:

- Die Elementarreaktionen sind meist nicht aufgeklärt.
- Der Reaktionsmechanismus kann meist nicht angegeben werden.
- Die Reaktionsgeschwindigkeitskonstanten sowie die Aktivierungsenergie sind nicht bekannt.

So sind die Reaktionsabläufe erst für wenige homogene Reaktionen im Detail aufgeklärt.

Brennbare Stoffe können in Abhängigkeit von bestimmten Randbedingungen wie Zerteilungsgrad, Lagerungsform u. a. in einem solchen Maß exotherm reagieren, indem ab einer bestimmten Stofftemperatur messbar Wärme freigesetzt wird. Bedingt durch die innerhalb der Stoffanhäufung ablaufenden exothermen Prozesse wird eine Stofftemperatur erreicht, die in der Regel oberhalb der Umgebungstemperatur liegt. Sie wird von der Stoffart und den Bedingungen für den Wärmestau beeinflusst. Die Höhe der erreichbaren Temperatur durch eine in den Stoffen ablaufende Selbsterwärmung wird insbesondere von der Wärmebilanz aus den wärmeerzeugenden Prozessen und den Wärmeverlusten bestimmt. Unter bestimmten Randbedingungen insbesondere bei zu großen Wärmeverlusten kann die Selbsterwärmung wieder abklingen. Wesentlich hierfür ist, dass die freigesetzte Wärmemenge und die Geschwindigkeit der Wärmefreisetzung ein solches Ausmaß erreichen, dass die Reaktion einen spontanen Verlauf nimmt. Im Rahmen von experimentellen Untersuchungen lässt sich aus der Temperaturanstiegsgeschwindigkeit abschätzen, ob eine Selbsterwärmung in eine Selbstentzündung übergeht.

Als eine geeignete Methode zur Beurteilung des thermischen Verhalten und des thermisch bedingten Abbaus von Stoffen hat sich die Thermoanalyse erwiesen. Im Besonderen werden für solche wie im Rahmen dieser Betrachtungen durchzuführende Untersuchungen die Thermogravimetrie (TG), die Differential-Thermo-Analyse (DTA) und die Differential-Scanning-Calorimetry (DSC) eingesetzt (siehe auch Punkt 5.3.4), wobei die DTA als eine qualitative und die DSC als eine quantitative Methode zu betrachten sind. Die vorgenannten thermischen Analysenverfahren gestatten eine Erfassung der infolge Einwirkung von Wärme bei vielen Stoffen ablaufenden charakteristischen chemischen

Reaktionen und physikalischen Prozesse, die insbesondere durch Enthalpie- und/oder Masseänderungen gekennzeichnet sind.

1.4.2.10 Selbstentzündungstemperatur

Unter Selbstentzündung ist die Entzündung eines brennbaren Stoffes ohne Einwirkung einer Zündquelle (ohne Fremdzündung durch Funken od. Flammen) zu verstehen. Die **Selbstentzündung** (auch Eigenzündung genannt) ist eine Art der Zündung, bei der die Zündenergie durch die Selbsterwärmung des brennbaren Stoffes geliefert wird. Die Selbsterwärmung kann aber nur zu einer Selbstentzündung führen, wenn die Geschwindigkeit der Wärmefreisetzung die Geschwindigkeit der Wärmeabgabe an die Umgebung übersteigt (nichtadiabate Verhältnisse). Diese Randbedingung wird als Wärmestau bezeichnet. **Adiabate Verhältnisse** liegen vor, wenn kein Wärmetransport über die Systemgrenze hinaus stattfindet. Somit kann bei ausgeprägten Wärmestaubedingungen von einer Annäherung an adiabate Verhältnisse ausgegangen werden.

Die Oxidationsmittelzufuhr wie in Form von Luft und die wärmephysikalischen Eigenschaften der beteiligten Stoffe und ggf. auch katalytischen Effekte üben einen bedeutenden Einfluss aus. Durch die sich einstellende Temperaturerhöhung steigt die Reaktionsgeschwindigkeit annähernd nach der Van-'t-Hoff-Regel (Abhängigkeit einer Gleichgewichtskonstante K_p von der Temperatur T):

$$\frac{d(\ln K_p)}{dT} = \frac{\Delta H}{R \cdot T^2} \quad (27)$$

mit R = Gaskonstante und ΔH = Reaktionsenthalpie.

Qualitativ bedeutet dies, es kommt zu einer Verschiebung des Gleichgewichtes bei einer exothermen (endothermen) Reaktion mit zunehmender Temperatur zugunsten der entstehenden Produkte (Edukte). Das heißt, **eine Temperaturerhöhung um jeweils 10 Kelvin steigert die Reaktionsgeschwindigkeit auf das Zwei- bis Vierfache**. Eine Erhöhung der Reaktionsgeschwindigkeit bewirkt wiederum eine Zunahme der Energiefreisetzung pro Zeit, so dass sich das System bis auf eine kritische Temperatur erhitzen kann. Die Zündung aus thermodynamischer Sicht ist erfolgt, wenn ein Glimmbrand ausgelöst wurde. Als selbstentzündlich gelten z. B. Stoffe, deren Entzündung im Bereich der üblichen Umgebungstemperatur und an der Luft ohne Einwirkung einer Zündquelle eintritt, d. h. sie neigen zur Selbstentzündung, ohne dass eine externe Energiezuführung erfolgt. Derartige Stoffe müssen deshalb unter Luftabschluss aufbewahrt werden. Grund ist eine spontane Reaktivität z. B. mit dem Sauerstoff der Luft. Hierzu zählen Stoffe wie weißer Phosphor in Partikelform, metallorganische Verbindungen wie Aluminiumalkyle, sogenannte pyrophore Metalle (d. h. bestimmte Metalle in frisch gemahlener und besonders feinkörniger Form), Eisensulfide, u. a. Selbstentzündung ist auch möglich, wenn Stoffe spontan nach Feuchtigkeitseinwirkung reagieren wie Alkalimetalle, Calciumkarbid, Branntkalk, Magnesiumnitrid, Natriumhydrid und -sulfid. Zu selbstentzündlichen Stoffen gehören aber auch solche Produkte wie z. B. Heu, Stroh- und andere Pflanzenpellets, pflanzliche Öle mit einem hohen Gehalt an ungesättigten Fettsäuren wie Leinöl in Verbindung mit Trägerstoffen wie Textilien aber auch inerten Materialien wie Glaswolle,

bestimmte Holzstäube aber auch Braunkohle, Veredlungsprodukte aus Braunkohle und organische Peroxidverbindungen.

Vielschichtige Randbedingungen sind für die Selbstentzündung von Erntegut (feucht eingebrachtes Heu), Halböle in organischem Material (öldurchtränkte Lappen), pflanzliche Fette in Textilien, Anstrichstoffe (Nitrofarbe), Massivholz, Braun- und Steinkohle, Chemikalien, Aktivkohle verantwortlich.

Sicher muss an dieser Stelle eingeräumt werden, dass allein mit Labormethoden Selbstentzündungen nicht sicher nachgewiesen werden können und auch die Bestimmung der Selbstentzündungstemperatur rein aus Gründen der experimentellen Machbarkeit im Labormaßstab an Grenzen stößt. Es sollte deshalb, insbesondere auch in Hinblick auf durch Selbstentzündung ausgelöste Schadensfälle geprüft werden:

- ist aus stofflicher Sicht eine Selbstentzündung möglich
- kann unter Berücksichtigung der Rand- und Umgebungsbedingungen eine Selbstentzündung eintreten und
- ist unter Beachtung der zeitlichen Bedingungen, d. h. vom Beginn des Vorhandenseins des selbstentzündlichen Stoffes bis zum Eintritt des exotherm-reaktiven Prozesses, eine Selbstentzündung wahrscheinlich

1.4.2.11 Mindestzündenergie

Unter Mindestzündenergie (siehe auch Punkt 4.7) wird die Energiemenge verstanden, durch die ein brennbarer Stoff gerade noch entzündet werden kann. Ausgehend von der vorgenannten Feststellung, dass die Zündung eines brennbaren Stoffes in der Regel nur in der Gasphase möglich ist, müssen brennbare feste bzw. flüssige Stoffe in die Gasphase überführt (umgewandelt) werden, damit eine Zündung und anschließend eine selbständig ablaufende Reaktion (Brennen) möglich sind. Dementsprechend ist die Mindestzündenergie bei explosionsfähigen Gas- bzw. Dampf-Luft-Gemischen extrem niedrig, in Verbindung mit festen Stoffen dagegen in der Regel wesentlich größer. Deshalb werden mit der Mindestzündenergie als sicherheitstechnische Kennzahl vor allem Gas-, Dampf-, Nebel- und Staub-Luft-Gemische hinsichtlich ihrer Zündgefährlichkeit charakterisiert. Definitionsgemäß ist unter der Mindestzündenergie die kleinste Energiemenge eines Kondensator-Entladungsfunkens zu verstehen, die das zündwilligste Gemisch von Gasen, Dämpfen, Nebeln oder Stäuben mit Luft gerade noch zünden kann. Die Mindestzündenergie von Gas- und Dampf-Luft-Gemischen bewegt sich im Bereich von 0,01 mJ bis 1 mJ. Bei Staub-Luft-Gemischen beträgt sie in Abhängigkeit von der Staubfeinheit zwischen 5 mJ bis 100 mJ (siehe Tabelle 20 im Anhang). Die Mindestzündenergie wird in Verbindung mit Grenzspaltweite und Mindestzündstromverhältnis für die Gefährdungsbeurteilung im Rahmen einer Unterteilung von Stoffen in Explosionsgruppen (Explosionsklassen) entsprechend DIN EN 50014 (VDE 0170/0171 Teil 1) herangezogen. Es gilt, je höher die Zündwilligkeit der brennbaren Gase und Dämpfe ist, desto geringer müssen Grenzspaltweite oder Mindestzündstrom sein, um eine Zündung zu verhindern.

$$W = \frac{I}{2} C \cdot U^2 = \frac{Q^2}{2 \cdot C} \approx 0,01 \cdot S^2 \quad (28)$$

[W] - gespeicherte Energie in mW s

[C] - Kapazität des Kondensators in pF

[U] - Anfangsspannung des Kondensators in kV

[Q] - Ladung in μAs

[S] - Grenzspaltweite in mm

Nachfolgende Abbildung verdeutlicht die Abhängigkeit der Mindestzündenergie vom Abstand der Zündelektroden.

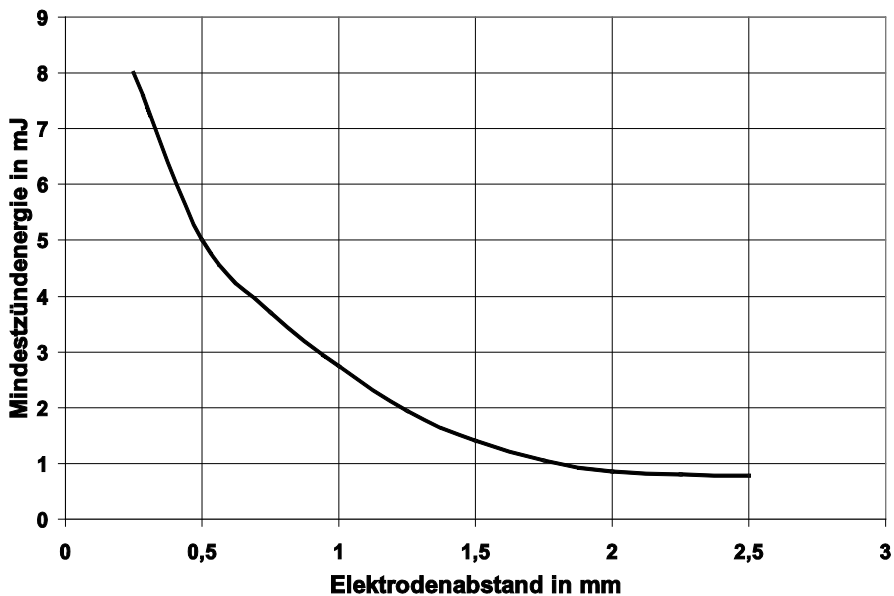


Abb. 23: Mindestzündenergie als Funktion des Elektrodenabstandes (schematisch)

Die Mindestzündenergie sinkt mit steigender Temperatur und steigendem Druck. Da nur wenige Messreihen bei nichtatmosphärischen Bedingungen vorliegen, sind verallgemeinerbare Aussagen z. Zt. nicht möglich.

1.4.2.12 Minimaler explosionsgefährlicher Sauerstoffgehalt

Der minimale explosionsgefährliche Sauerstoffgehalt (siehe auch Punkt 4.7), auch als Sauerstoffgrenzkonzentration bezeichnet, ist die Sauerstoffkonzentration in einem Gemisch aus Luft und inerten Gasen, das bei Zutritt zu brennbaren Gasen, Dämpfen und

Stäuben nach der Zündung gerade noch eine Ausbreitung der Verbrennung erlaubt. Sie ist abhängig sowohl vom Einsatzstoff als auch von der Konzentration des Inertgases.

Die Ermittlung der Sauerstoffgrenzkonzentration erfolgt dergestalt:

- Herstellung eines Ausgangsgemischs mit optimaler Konzentration in Luft
- Durch Zugeben von Inertgas in Schritten von 1 Vol.-% wird die Sauerstoffkonzentration solange verringert, bis das jeweilige Gemisch nicht mehr entzündet werden kann

Die Sauerstoffgrenze sinkt mit steigender Temperatur und Zündenergie – bei Stäuben auch mit abnehmender Korngröße. Außerdem wird sie von der Art des Inertgases insofern beeinflusst, wie dessen Fähigkeit als Wärme aufnehmendes Ballastgas ausgeprägt ist. So beträgt die Sauerstoffgrenze für Methan in Kohlendioxid 15,5 Vol.-%, in Stickstoff 12,7 Vol.-%, in Helium 12,6 Mol-% und in Argon 10 Vol.-% (Kohlendioxid ist demnach hier wie bei den meisten Brennstoffen das wirksamste Inertgas, siehe auch Ausführungen zu den Explosionsgrenzen).

Tab. 10: Minimale Sauerstoffkonzentrationen einiger Stoffe bei verschiedenen Temperaturen in Vol.-%

Temperatur in °C	Ethanol	Isopropanol	Hexan	Methan
20	8,6	8,7	9,3	10,7
100	8,1	8,1	8,9	9,9

Die Verringerung der Sauerstoffkonzentration in der Verbrennungsluft durch Inertgas führt zur Sauerstoffgrenze. Der hierfür erforderliche Inertgasanteil heißt **phlegmatisierende Mindestkonzentration**. Wird diese überschritten – und somit die Sauerstoffgrenze unterschritten – so sind Gemische mit beliebiger Brennstoffkonzentration nicht mehr zündwillig. Bedeutung hat die Sauerstoffgrenze für die Verhinderung von Explosionen sowie das Löschen von Bränden in Behältern und Räumen durch Inertgasanwendung.

1.4.3 Brennbarkeit von Stoffen

Brennbarkeit ist die Fähigkeit der brennbaren Stoffe mit einem Oxydationsmittel (meistens der Sauerstoff in der Luft) unter intensiver Licht- und Wärmefreisetzung selbständig zu reagieren, d. h. zur selbständigen Aufrechterhaltung der stabilen Verbrennung nach Zündquellenentfernung befähigt zu sein. Somit hängt die Brennbarkeit von Stoffen von ihrer Fähigkeit ab, sich mit Sauerstoff zu verbinden. Die Stoffe werden deshalb eingeteilt in

- nicht brennbar,
- schwer brennbar,
- brennbar und
- leicht brennbar.

- Nicht brennbar sind z. B. solche Stoffe, die schon vollständig mit Sauerstoff reagiert haben, wie die Oxide.
- Schwerbrennbare Stoffe sind Stoffe, die nach dem Entzünden nur weiterbrennen, wenn Fremdenergie zugeführt wird. Sie erlöschen nach Fortnahme der Zündquelle.
- Normalbrennbare Stoffe sind Stoffe, die nach dem Entzünden und nach Fortnahme der Zündquelle selbstständig mit normaler Geschwindigkeit weiterbrennen.
- Leichtbrennbare Stoffe sind Stoffe, die nach dem Entzünden mit hoher Flammenausbreitungsgeschwindigkeit und damit schneller Freisetzung ihrer Verbrennungswärme brennen. Hierunter fallen Feststoffe wie z. B. zerkleinertes Holz in Form von Holzwolle, Papier, die meisten brennbaren Flüssigkeiten und Gase.

Bei der Einstufung der Stoffe hinsichtlich ihrer Brennbarkeit in Brennbarkeitsgruppen wird als eine Randbedingung der Sauerstoffgehalt der Luft (21 Vol.-%) zu Grunde gelegt. Erfahrungsgemäß ist eine Vielzahl von Stoffen bei deutlich geringeren Sauerstoffkonzentrationen, wie in der Luft vorhanden, überhaupt nicht in der Lage zu brennen. Steigt die Sauerstoffkonzentration auf > 21 %, verbrennen einige Stoffe deutlich schneller bzw. sind andere Stoffe ab solchen Konzentrationen überhaupt erst in der Lage, zu brennen. Bei sehr hohen Sauerstoffkonzentrationen (> 50 %) brennen selbst Stoffe, die allgemein als nicht brennbar gelten (z. B. Metalle wie Eisen).

Zur Beurteilung der Brennbarkeit wird vor allem die Kenngröße **Sauerstoffindex** benutzt.

Eine sinngemäße Anwendung des Begriffs Brennbarkeit erfolgt auch im Rahmen der brandschutzmäßigen Beurteilung von Baustoffen. Derzeit erfolgt die Einteilung in Baustoffklassen, wobei Baustoffe nach ihrem Brandverhalten in nichtbrennbare Stoffe der Klasse A und brennbare Stoffe der Klasse B unterschieden werden.

Tab. 11: Brennbarkeitsgruppen von Baustoffen

Baustoff- klasse	bauaufsichtliche Bezeichnung	Normbezeichnung
A	nicht brennbar	Nicht brennbare Stoffe
A1	nicht brennbar	Ohne oder geringfügige organische Bestandteile
A2	nicht brennbar	nur geringe organische Bestandteile
B	brennbar	Brennbare Baustoffe
B1	schwer entflammbar	Schwer entflammbare Baustoffe
B2	normal entflammbar	Normal entflammbare Baustoffe
B3*	leicht entflammbar	Leicht entflammbare Baustoffe

* Verwendung im Bauwesen grundsätzlich nicht zulässig

Um in die Baustoffklassen aufgenommen zu werden, müssen Baustoffe mit dem nach DIN 4102 Teil 4 Nr. 2 klassifizierten Baustoffen übereinstimmen oder entsprechende Prüfungen bestehen. So wird zur Beurteilung der Brennbarkeit das Brandverhalten der zu untersuchenden Stoffe nach ihrer Entflammbarkeit herangezogen (weiteres siehe Pkt.1.1 und 1.4). Im Einzelfall sind die Bauregellisten des Deutschen Instituts für Bau-technik einzusehen, um die Verwendbarkeit von Bauteilen zu ermitteln.

1.4.4 Kennzahlen der Brennbarkeit

1.4.4.1 Sauerstoffindex

Der Sauerstoffindex (Limited Oxygen Index – LOI oder Oxygen Index – OI) ermöglicht eine differenzierte Beurteilung und Klassifizierung von Stoffen hinsichtlich ihrer Brennbarkeit, d. h. der Zweck der LOI-Prüfung besteht in der Messung der relativen Brennbarkeit von Materialien. Er entspricht dem minimalen Anteil an Sauerstoff in einem Sauerstoff-/Stickstoffgemisch, der das Brennen mit Flammen unter festgelegten Bedingungen gerade noch ermöglicht. Der LOI wird in Prozent angegeben (ASTM D 2863 – ISO 4589). Zur Messung wird einer brennenden Werkstoffprobe ein Gemisch aus O₂/N₂ mit sinkendem O₂-Gehalt zugeführt, bis die Flamme erlischt. Der LOI ist definiert als die Mindest-Sauerstoffkonzentration, in der das Material drei Minuten lang brennt oder die Probe über eine Distanz von 50 mm brennend halten kann. Ein Werkstoff mit einem LOI-Wert von z. B. 20 gilt als brennbar, ein solcher mit einem Wert von 32 als flammwidrig. Flammwidrige, halogenfreie Werkstoffe haben meist einen LOI-Wert von größer 35. Je höher der LOI-Wert ist, desto geringer ist die Wahrscheinlichkeit der Verbrennung. Der LOI ist allerdings nur eine Kenngröße für einen aus einem Stoff oder einer Stoffmischung bestehenden Werkstoff. Rückschlüsse zum Brandverhalten von Produkten im Brandfall oder bei einer Brandprüfung, z. B. von Kabeln, sind kaum möglich, da hierbei der gesamte Aufbau und die Zusammensetzung des Produktes dessen Brandverhalten beeinflusst.

Mit Erhöhung der Prüftemperatur im Vergleich zu den sonst üblichen Standardbedingungen (Umgebungstemperatur) bei der Bestimmung des LOI sinkt dieser. Der damit erhaltene Messwert für den LOI bei der erhöhten Temperatur wird auch als Temperaturindex bezeichnet. Dieser ist nicht zu verwechseln mit dem relativen Temperaturindex, der im Sinne eines Wärmebeständigkeitsparameters zu verstehen ist und die maximale Dauergebrauchstemperatur beschreibt.

1.4.4.2 UL-94-Test

Zur Untersuchung des Brandverhaltens von Kunststoffen insbesondere zu deren Brennbarkeit wird weiterhin die Methode UL-94-Test durchgeführt.

UL steht für eine unabhängige Kontrollorganisation (Underwriters Laboratories) in den USA, die diesen Test entwickelt hat. Auf der Grundlage der mit dieser Methode erzielten Ergebnisse erfolgt eine Klassifizierung der Entflammbarkeit (Brennbarkeit) von Kunststoffen. Es werden Prüfkörper (Stäbe) in vertikaler als auch in horizontaler Anordnung

mittels eines Brenners entzündet und anschließend die Brenndauer sowie der Verlauf des Brennvorgangs erfasst.

Bei dem Vertikaltest wird die Probe unten gezündet. Eine Probe erreicht die Klassifikation V-0, d. h. wenn die Probe spätestens nach 10 Sekunden von selbst verlöscht, brennende Tropfen nicht auftreten und ein Nachglimmen maximal 30 Sekunden dauert, so weist sie im brandschutztechnischen Sinne die günstigsten Brennbarkeitseigenschaften auf.

Bei der Testmethode HB wird ein horizontal angeordneter Prüfkörper an einem Ende entzündet. Die Brenngeschwindigkeit darf $76 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$, bei über 3 mm dicken Prüfkörpern $38 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$, nicht überschreiten.

1.4.5 Brandverhalten brennbarer Stoffe

Wie schon unter Punkt 1.1 ausgeführt, wird der eigentliche Verbrennungsprozess durch das Brandverhalten der brennbaren Stoffe charakterisiert. So ist auch die Definition zu verstehen, indem unter Brandverhalten das Verhalten eines Stoffes oder Gegenstandes bei Einwirkung eines Brandes verstanden wird, das sich zudem noch in äußeren, d. h. physikalischen und/oder chemischen Veränderungen zeigt. Im Folgenden wird deshalb ausschließlich auf grundlegende Aspekte zum Brandverhalten von Stoffen und der dafür wesentlichen Randbedingungen eingegangen, während die das Brandverhalten charakterisierenden Kenngrößen wie **Abbrandgeschwindigkeit**, **Brandausbreitungsgeschwindigkeit**, **Flammenausbreitungsgeschwindigkeit**, **Flammentemperatur**, **Wärmestromdichte** u. a. im Punkt 1.5 beschrieben werden.

1.4.5.1 Feststoffe

Brennbare feste Stoffe sind, außer schwebende Stäube, in der Regel nicht in der Lage, direkt in Flammen verbrannt zu werden, vielmehr bedürfen sie einer verbrennungsgerechten Aufbereitung in Form von Pyrolyse und/oder Verdampfung. In diese Vorgänge kann ein Schmelzprozess eingelagert sein. Beispiele:

- a) schmelzen und verdampfen – z. B. Paraffin,
- b) sich unter Entwicklung brennbarer Gase zersetzen – z. B. Holz.

Während bei den schmelzenden und anschließend verdampfenden Stoffen davon auszugehen ist, dass sie sich auch als der ursprüngliche „chemische“ Stoff in der Dampfphase wiederfinden, ist bei der Freisetzung von gasförmigen Produkten infolge Pyrolyse von einer äußerst komplexen Zusammensetzung hinsichtlich der Inhaltsstoffe auszugehen. Das Spektrum reicht z. B. bei hochpolymeren Kunststoffen von Monomeren (Ausgangsstoff für die Herstellung der Kunststoffe), über Fragmente dieser Monomeren bis hin zu solchen Pyrolysegasen wie CO, HCN, HCl u. a. Die Freisetzung brennbarer (aber auch nichtbrennbarer) gas- bzw. dampfförmiger Stoffe ist dabei im Wesentlichen die Folge einer Wärmerückführung aus der Flamme.

Eine Sonderstellung unter den Feststoffen nehmen die Metalle hinsichtlich ihres Brandverhaltens ein. Metalle in kompakter Form sind in der Regel als unkritisch zu beurteilen, solange sie nicht über den Schmelzpunkt hinaus erwärmt werden. Stäube und feine Späne bestimmter Metalle wie Magnesium, Aluminium u. a. sind meist leichtentzündlich. Einige Metalle (Alkalimetalle, Erdalkalimetalle) reagieren spontan mit Luftsauerstoff unter Freisetzung von so viel Wärme, dass sie sich von selbst entzünden können. Darüber hinaus besitzen die hier betrachteten Metalle auch gegenüber anderen Stoffen eine hohe Reaktivität, die zum Brand führen kann. Diese Reaktivität kann sich im Brandfall noch verstärken, wenn ungeeignete Löschmittel eingesetzt werden (Untauglichkeit von Wasser als Löschmittel bei Metallbränden – Bildung von hochexplosivem Wasserstoff). Bei Metallbränden sind sehr hohe Brandtemperaturen zu erwarten. Sie können z. B. bei Magnesiumbränden bis zu 3000 °C betragen, wenngleich dies nur für die unmittelbare Verbrennungszone gilt. Begleitet wird der Verbrennungsprozess oftmals durch einen intensiven und grellen Lichtschein.

1.4.5.2 Flüssigkeiten

Brennbare Flüssigkeiten sind außer in Form entsprechender Aerosole (feinste Flüssigkeitstropfen in Luft) ebenfalls nicht in der Lage, direkt in Flammen verbrannt zu werden. Auch sie bedürfen einer verbrennungsgerechten Aufbereitung in Form ihrer Verdampfung, d. h. es brennt nicht die Flüssigkeit selbst, sondern es brennen immer die Flüssigkeitsdämpfe (Der Dampf ist rein physikalisch und für sich betrachtet die gasförmige Erscheinungsform, d. h. ein Aggregatzustand der brennbaren Flüssigkeit). Entsprechend der anzutreffenden Erscheinungsformen ist vor allem in Brände in offenen Behältern und Lachenbrände zu unterscheiden. Insbesondere bei Lachenbränden steht das Brandverhalten in direktem Zusammenhang mit der Größe der Lachen, der Untergrund-(Boden-)beschaffenheit sowie der Viskosität und der Oberflächenspannung der Flüssigkeit.

Wie schon bei den festen Brennstoffen ausgeführt, wirken sich bei brennbaren Flüssigkeiten besonders deren Verteilungsgrad (z. B. Flüssigkeit in Behälter, Flüssigkeit in einer geschlossenen Lache oder Flüssigkeit vernebelt) und die Temperatur nachhaltig auf das Brandverhalten aus. Verdampft die Flüssigkeit in einem solchen Maß, dass sich nach erfolgter Zündung eine stabile Verbrennung einstellt, wird die Brennpunkttemperatur überschritten. Die aus der Flamme resultierende Wärmerückwirkung stützt die weitere Verdampfung und Verbrennung.

1.4.5.3 Gase

Unter Bezug auf die gegebene Definition zur Brandklasse C (brennbare Gase) sind hierbei insbesondere unter Druck stehende ausströmende brennbare Gase zu beachten. Sie können z. B. aus technischen Anlagen, Rohrleitungen und Druckbehältern ausströmen. Nach einer Vermischung mit Luft, die sich oftmals schon während des Ausströmens vollzieht, sind die sich dabei bildenden Gemische brennbar. Ein wesentliches Unterscheidungskriterium zwischen Gasen und Dämpfen brennbarer Flüssigkeiten besteht vor allem darin, dass der Siedepunkt bei Gasen, die sich verflüssigen lassen, in der Regel deutlich unter 20 °C liegt. Gas- oder dampfförmige brennbare Stoffe sind somit als ein homogenes Gemisch, bestehend aus Brennstoff und dem Oxidationsmittel Luft, zu erwarten. Im Falle

einer Freisetzung (Verdampfen, diskretes Ausströmen) in ruhender Luft können sich Konzentrationsschichtungen im freien Luftraum entwickeln (siehe Punkt 1.4.1). Der Hauptgrund für dieses Phänomen besteht in der im Allgemeinen größeren Dichte der brennbaren Gase (Ausnahme: Wasserstoff, Methan u. a. – siehe auch Tabelle 3 im Anhang) und der Dämpfe der meisten brennbaren Flüssigkeiten im Vergleich zur Dichte der Luft sowie dem Fehlen solcher für eine Vermischung notwendigen Randbedingungen wie Turbulenzen, Ventilationen bzw. Wärmekonvektion im Freisetzungsbereich.

Die Verbrennung von Gasen erfolgt immer in Flammen.

1.4.6 Erscheinungsformen

In Abhängigkeit vom Aggregatzustand des Brandstoffes und einigen Brandbedingungen zeigen Brände ein typisches Verhalten mit gemeinsamen Merkmalen. Deshalb sollen diese Merkmale gesondert hervorgehoben werden.

1.4.6.1 Feststoffbrände

Feste Brandstoffe sind als Brennstoffe und in verarbeiteter Form wie als Baustoffe und Baumaterialien aber auch in lagerförmiger Anordnung häufig in der Praxis zu finden. Insofern sind auch Feststoffbrände sehr vielfältig. Eine Systematik der Feststoffbrände ist somit nicht darstellbar. Auf die Sonderform des Staubbrandes soll hier ebenfalls hingewiesen werden, wobei damit nur das Brennen von lagerndem Staub gemeint ist. Das Brennen von schwebendem Staub wird im Zusammenhang mit den Explosionen behandelt.

1.4.6.2 Flüssigkeitsbrände

Flüssigkeitsbrände lassen sich in drei grundlegende Erscheinungsformen einteilen:

- Brände ruhender Flüssigkeiten
- Brände strömender Flüssigkeiten
- Brände von unter Druck versprühten Flüssigkeiten

Brände ruhender Flüssigkeiten

Bei Bränden ruhender Flüssigkeiten sind zwei Grundtypen zu unterscheiden:

- der Lachenbrand und
- der Brand im offenen Behälter (z. B. Tankbrand oder Tanktassenbrand)

Lachenbrände weisen in Abhängigkeit von ihrem Untergrundprofil oft nur eine geringe Schichtdicke (bis zu ≈ 1 cm) auf. Daraus resultiert eine relativ kurze Branddauer. Großflächige Lachenbrände sind aber insofern als problematisch zu beurteilen, weil in kurzer Zeit eine erhebliche Wärmefreisetzung erfolgt, die insbesondere in Form einer erhebli-

chen Wärmestrahlung auf die Umgebung wirkt und eine Brandausbreitung auf angrenzende weitere Brandstoffe verursachen kann.

Tankbrände weisen einige Besonderheiten auf, die im Folgenden näher betrachtet werden sollen. Nach Zündung einer Flüssigkeit in einem Tank bildet sich sehr schnell ein quasistationärer Zustand der Verbrennung aus, der durch eine konstante Abnahme des Flüssigkeitspegels (Abbrandgeschwindigkeit) gekennzeichnet ist. Dabei bilden sich die in nachfolgender Abbildung dargestellten Zonen aus.

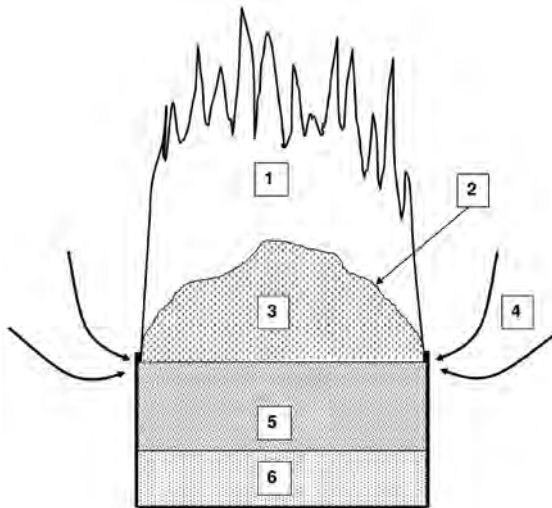


Abb. 24: Typische Zonen beim Flüssigkeitsbrand in einem offenen Tank

- 1 - Zone der Nachverbrennung und der Rauchgase
- 2 - Verbrennungszone
- 3 - Zone der thermischen Aufbereitung (Flüssigkeitsdampf und Zersetzungsprodukte)
- 4 - durch Auftriebsströmung injizierte Luft
- 5 - Zone der Flüssigkeitsvorwärmung
- 6 - Flüssigkeit

Hinsichtlich der vorgenannten Konstanz der Abbrandgeschwindigkeit sind aber nachfolgende Einschränkungen zu beachten:

1. Die Abbrandgeschwindigkeit hängt sehr stark von der Strahlungsintensität der Flamme ab, die auf die Flüssigkeitsoberfläche einwirkt. Mit einer Vergrößerung des Abstands zwischen Flammenboden und Flüssigkeitspegel, dies tritt mit zunehmender Branddauer bei endlich großen Tanks (bis ca. 5 m Durchmesser) auf, nimmt der

Wärmeverlust über die Tankwand zu und folglich verringert sich die Wärmeübertragung auf die Flüssigkeitsoberfläche. Die Abbrandgeschwindigkeit sinkt in einem Ausmaß, so dass die Flamme verlöschen kann.

2. Die vorgenannte Erscheinung wird bei gleich großen Behälterdurchmessern vor allem dann zu erwarten sein, je höher der Flammpunkt der im Tank befindlichen Flüssigkeit liegt. So verlischt ein Behälterbrand unter Beteiligung von Dieseldieselkraftstoff (Flpkt. $> 55\text{ °C}$) z. B. bei einem Durchmesser von 0,30 m, von 0,50 m bzw. von 0,95 m, wenn der Flüssigkeitsspiegel um 1,8 m, um 3,0 m bzw. um 5,8 m, gemessen vom Behälterrand, abgefallen ist. Ab einem Durchmesser von $\gg 1\text{ m}$ besitzt diese Erscheinung keine praktische Bedeutung mehr.
3. Bei Tanks mit sehr großem Durchmesser hat das Absinken des Flüssigkeitsspiegels nur einen geringen Einfluss auf die Abbrandgeschwindigkeit, weil die Flamme in den Tank eintauchen kann und sich der Abstand Flamme-Flüssigkeitsniveau kaum verringert.
4. Die Abbrandgeschwindigkeit ändert sich bei Windeinfluss. So erhöht sich z. B. bei Ottokraftstoff die Abbrandgeschwindigkeit bei einer Windgeschwindigkeit von 5 m s^{-1} im Vergleich zur Windstille etwa um 50 %. Die intensivere Durchmischung der Dämpfe mit Luft führt zu einer Erhöhung der Flammentemperatur, die bis zu 100 Kelvin erreichen kann.
5. Bei extrem hohen Windgeschwindigkeiten kann es bei Flüssigkeitsbränden zum Abreißen der Flamme kommen. So wurde dies bei einem mit Dieseldieselkraftstoff gefüllten Tank von 3 m Durchmesser bei einer Windgeschwindigkeit von 22 m s^{-1} bzw. $79,2\text{ km h}^{-1}$ beobachtet.

Beim Brennen eines Gemischs aus mehreren brennbaren Flüssigkeiten (z. B. Kohlenwasserstoffe unterschiedlicher Kettenlänge) findet in der oberen Flüssigkeitsschicht eine „fraktionierte Destillation“ statt, d. h. die leichter siedende Komponente der brennbaren Flüssigkeit „speist“ primär die Flamme. Die Zusammensetzung der Dampfphase unterscheidet sich somit von der flüssigen Phase. Infolgedessen vollzieht sich im Flüssigkeitsgemisch während des Brandes eine Anreicherung mit den schwerer siedenden Komponenten, die den niedrigsten Dampfdruck haben. Hierzu sollen die nachfolgenden Beispiele betrachtet werden:

- In einem Gemisch brennbarer Flüssigkeiten (z. B. Siedebereichsfraktionen aliphatischer Kohlenwasserstoffe wie Ottokraftstoff – Siedebereich zwischen 30 °C und 210 °C), erhöht sich die Siedetemperatur der Flüssigkeit während des Brandes, wodurch die Temperatur der oberflächennahen Schicht ebenfalls ansteigt.
- Gemische brennbarer Flüssigkeiten mit Wasser können als homogenes Gemisch (z. B. Ethanol/Wasser) oder Emulsionen (z. B. Roherdöl mit Wasser) auftreten. Das Brandverhalten derartiger Gemische wird aber im Wesentlichen davon bestimmt, ob der Siedepunkt der nicht wässrigen Komponente unter- oder oberhalb von dem des Wassers liegt.

- Liegt der Siedepunkt der brennbaren Flüssigkeit unter 100 °C, so erhöht sich im Ergebnis der fraktionierten Destillation der Wasseranteil in der flüssigen Phase. Bei langer Brandzeit solcher Gemische kann durch den steigenden Wasseranteil die Flamme verlöschen, ohne dass die Flüssigkeit völlig verbrannt ist – siehe auch Tabelle 34 im Anhang.
- Liegt der Siedepunkt des flüssigen Brandstoffs über 100 °C, so verringert sich der Feuchtigkeitsgehalt des Brandstoffs während des Brandes. Bedingt durch den für die Verdampfung des Wasser erhöhten Wärmebedarf wird weniger brennbare Flüssigkeit verdampft, was anfangs zu einer Verringerung der Abbrandgeschwindigkeit führt. Mit dem weiteren Absinken des Feuchtigkeitsgehalts erhöht sich die Abbrandgeschwindigkeit wieder, bis sie den Wert des wasserfreien, flüssigen Brandstoffs erreicht.

Für den Brandverlauf eines Tankbrandes ist die Durchwärmung der Flüssigkeit von besonderer Bedeutung [1.1], [1.5], [1.10]. So wird die Flüssigkeitsoberfläche infolge der auf sie wirkenden Strahlungswärme der Flamme erwärmt. Die Wärmeübertragung von der Oberfläche in die Tiefe der Flüssigkeit erfolgt durch Wärmeleitung und laminare Flüssigkeitskonvektion. In Abhängigkeit des quantitativen Anteils von Wärmeleitung bzw. Konvektion unterscheidet man zwei Durchwärmungstypen:

- Beim Typ 1 erfolgt die Wärmeübertragung in der Flüssigkeit nur durch Wärmeleitung. Die Temperatur der oberflächennahen Schicht der Flüssigkeit entspricht dem Siedepunkt. Die Flüssigkeit wird nur in einer Tiefe von 2 cm bis 5 cm erwärmt. Darunter fällt die Temperatur sehr schnell ab (siehe nachfolgende Abb. 26). Die Tiefe der erwärmten Schicht bleibt konstant, d. h. sie ändert sich während des Abbrands nicht. Dieser Typ ist dadurch gekennzeichnet, dass die Siedetemperatur der Brandstoffe höher ist als die Temperatur der aufgeheizten Tankwand. Dazu gehören Trafoöl, Petroleum, Dieselkraftstoff, Solaröl und hochsiedende Erdöldestillationsrückstände (Masut – russ., auch als schweres Heizöl zu verstehen).
- Beim Typ 2 erfolgt die Wärmeübertragung zusätzlich zur Wärmeleitung durch Flüssigkeitskonvektion. Das Wirken der Konvektion steht im Zusammenhang mit der Erwärmung der Tankwand. Steigt die Temperatur der Tankwand über die Siedetemperatur des Brandstoffs oder des in ihm emulgierten Wassers, so kommt es zur Bildung von Dampfblasen, die aufsteigen und die Durchmischung bewirken. Es entsteht eine stärker erwärmte Schicht als beim Typ 1, die sich mit fortschreitender Branddauer laufend vergrößert (siehe nachfolgende Abb. 26). Sie wird homothermische Schicht genannt. Unterhalb dieser Schicht fällt die Temperatur ebenfalls schnell auf die Ausgangstemperatur ab. Der Typ 2 wird bei großen Tanks beobachtet. Beispiele für solche Brandstoffe sind Siedefraktionsgemische von benzinartigen Kohlenwasserstoffen, feuchtes Erdöl oder hochsiedende Erdöldestillationsrückstände

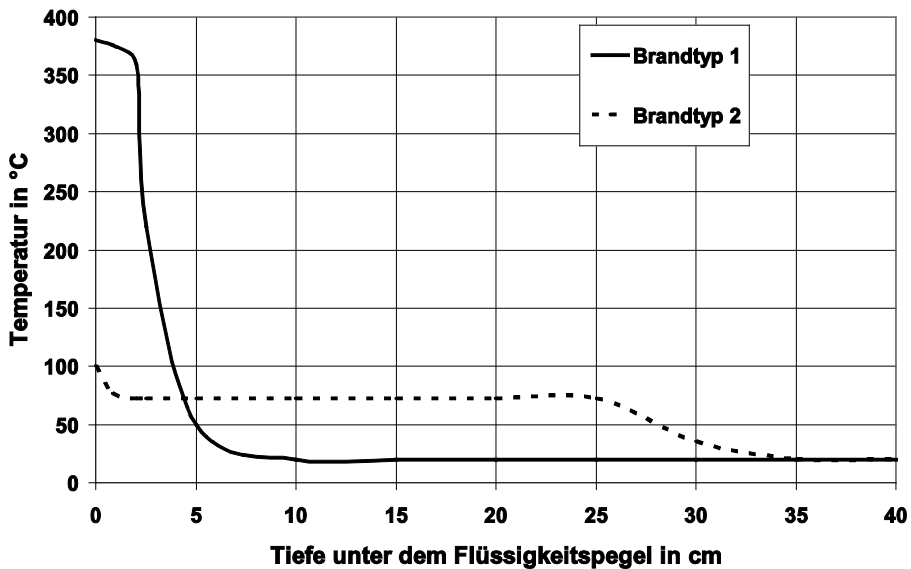


Abb. 25: Temperaturverteilung bei Tankbränden

Steigt die Temperatur der Tankwand bei Produkten des Typs 1, z. B. wenn die Tankwand nicht gekühlt wird, auf hohe Werte an, so kann sich auch bei diesen Stoffen eine homothermische Schicht bilden, d. h. sie können sich wie Stoffe des Typs 2 verhalten.

Gefürchtete Erscheinungen bei Tankbränden sind das Aufkochen und Auswerfen des Tankinhalts. Derartige Erscheinungen werden bei feuchten Erdölprodukten beobachtet, wenn es zum Durchwärmern in größeren Tiefen kommt (Typ 2). Unter Aufkochen versteht man den Übergang von emulgierten kleinen Wassertropfen in die Dampfphase und die infolge des Auftriebs zu beobachtende Schaumbildung. Der brennende Schaum kann über den Tankrand fließen und zur Brandausbreitung führen. Das Aufkochen tritt bei Erdöl mit einem Wassergehalt größer 3,8 % und bei Masut mit einem Wassergehalt größer 0,6 % auf. Das Aufkochen beginnt erst einige Zeit nach Brandbeginn, wenn die Durchwärmung bestimmte Tiefen erreicht. Infolge der Durchwärmung verringert sich die Viskosität des Brandstoffs und das spezifisch schwerere Wasser sinkt in tiefere Schichten, wobei es sich an der Grenzschicht der kalten Zone sammelt. Steigt die Temperatur dieser Grenzschicht auf Werte ≥ 100 °C, so verdampft das Wasser und es kommt zur Schaumbildung. Das Auswerfen brennender Erdölprodukte aus Tanks tritt ein, wenn es zu einem plötzlichen Sieden des überhitzten Wassers kommt, das sich unter der homothermischen Schicht des heißen Erdöls befindet. Dabei können je nach Tankgröße beträchtliche Mengen (10 t bis 100 t) ausgeworfen werden (Boilover). Die Auswurfhöhe erreicht mehr als 10 m. Die Auswurfweite kann ebenfalls mehr als 10 m betragen. Diese Vorgänge, die zu einer schlagartigen Brandausbreitung führen können, treten in der Regel erst nach einer längeren Branddauer (bis mehrere Stunden) auf.

Brände fließender Flüssigkeiten

Solche Brände treten bei verfahrenstechnisch bedingt strömenden Flüssigkeiten auf, wie z. B. in Form des Ömlaufs bei technischen Anlagen oder beim Austritt von brennbaren Flüssigkeiten aus technischen Anlagen unter sehr geringem Druck infolge einer Havarie. Derartige Brände sind dadurch gekennzeichnet, dass die Brandintensität sehr schnell anwächst und im Vergleich zum Abbrand ruhender Flüssigkeiten keinen konstanten Wert erreicht. Zur verbrennungsgerechten Aufbereitung des fließenden Brandstoffes tragen neben der Strahlung auch Wärmeleitung, Konvektion (Tropfen, Gase) und die mechanische Durchmischung bei. Brände fließender Flüssigkeiten sind nur dann sicher löschar, wenn der Flüssigkeitsstrom gestoppt werden kann.

Brände unter Druck versprühter Flüssigkeiten

Der Austritt brennbarer Flüssigkeiten aus teilweise unter hohem Druck stehenden verfahrenstechnischen Anlagen (Chemieanlage, Hydraulikanlage) vollzieht sich im Allgemeinen in Form einer Tröpfchenwolke (Aerosol). Aus diesem Grund besteht die Gefahr des Durchzündens solcher Wolken, weil nicht nur der Brennstoff schon fein verteilt vorliegt, sondern teilweise auch die Luft als Oxydationsmittel in der Wolke enthalten ist. Mit zunehmendem Zerteilungsgrad erhöht sich die Brandintensität. Die Gefährlichkeit derartiger Brände besteht darin, dass die Brandausbreitung, wie bei Gasbränden, generell räumlich erfolgt.

1.4.6.3 Gasbrände

Gasbrände entstehen häufig nach Gasaustritten, wobei die Gase drucklos oder unter Druck austreten können. Erfolgt die Verbrennung drucklos nach Austritt über eine Öffnung, ist von folgenden Relationen auszugehen:

1. Das Gas verbrennt in Form einer sich entwickelnden Gaswolke

Kommt es zur Zündung, wenn bereits bedeutende Gasmengen ausgetreten sind, ist auf Grund der Bildung explosibler Gemische mit hoher Wahrscheinlichkeit mit einer Explosion zu rechnen. Hier sind das Volumen der Wolke V_G bzw. das reaktionsfähige Volumen V_R von Bedeutung. Hinsichtlich der Flammentemperatur der Gaswolke wird im Allgemeinen von der adiabaten Flammentemperatur T_F in Höhe von ca. 2400 K ausgegangen. In technischen Anlagen gibt es deshalb Einrichtungen für Notentspannungen, um die Ausbildung von Gaswolken nach Produktaustritten zu verhindern. Hierbei wird das Gas einer Fackelanlage zugeleitet, wo es gefahrlos verbrennen kann.

2. Das Gas tritt unter Druck aus

Im Allgemeinen werden Gase unter Druck gelagert und transportiert, aber auch in chemischen Anlagen sind unter Druck stehende Gase zu erwarten. Deshalb muss in diesen Bereichen mit Bränden von unter Druck austretenden Gasen gerechnet werden. Die Gase verbrennen in Form eines Gasstrahls, der auch Fackel oder Fontäne genannt wird. Folgende Praxisbeispiele sollen den Sachverhalt beschreiben:

- Erdgassondenbrände
- Brände bei Gasaustritten aus defekten Gasleitungen, Druckgasflaschen, Behältern oder Apparaten,
- Brände bei Entspannungsvorgängen.

Beim Brand unter Druck stehender technischer Systeme strömt das Gas unter den Bedingungen einer entwickelten Turbulenz aus. Im Idealfall handelt es sich um turbulente Freistrahlen, deren Konzentrations- und Geschwindigkeitsprofil berechenbar sind. Freistrahlen sind mindestens nach einer Entfernung, die dem 6-fachen Durchmesser der Ausströmungsöffnung entspricht, im ganzen Strahl turbulent. Das Geschwindigkeitsprofil ist glockenförmig und der Durchmesser des Freistrahls nimmt linear mit der Lauflänge zu.

Bei Havarien kommt es häufig zur Ablenkung oder Brechung des Freistrahls, was zur Auflösung des Strahls führt. Gestörte Freistrahlen sind gefährlicher als ungestörte. Außerdem sind gestörte Freistrahlen kaum berechenbar.

Erfolgt eine Zündung des austretenden Gasstrahls sofort oder kurz nach Ausströmbeginn, führt dies zu einem stationären Brand. Durch die Turbulenz erfolgt eine intensive Luftermischung, die durch den Strahlimpuls $I = \dot{m}_0 \cdot w_0$ bewirkt wird. Nach Abbau des Strahlimpulses zerflattert der Strahl. Die Höhe einer frei brennenden Gasfackel lässt sich auf empirischem Weg [1.11], wie folgt,

$$\frac{h_{Fl}}{d_0} = \frac{w_0}{3,75 + 0,925w_0} (5,6 + 0,021H_u) \quad (29)$$

\dot{m}_0 - Austrittsmasse kg

w_0 - Austrittsgeschwindigkeit m s⁻¹

h_{Fl} - Flammenhöhe m

d_0 - Durchmesser der Flammenaustrittsöffnung m

H_u - unterer Heizwert kJ m⁻³

näherungsweise abschätzen.

Spontane Selbstentzündungen sind beim Austritt von z. B. heißen, unter hohem Druck stehenden Gasen, wie dem Austritt von Wasserstoff aus Hochtemperaturhydrierungsanlagen, möglich.

Bei Gasaustritten unter Druck bilden sich die Flammen nicht unmittelbar an der Austrittsöffnung aus, sondern in einer bestimmten Entfernung zur Austrittsöffnung. Die Lage der Flammenwurzel ist vom Gasdurchsatz abhängig. Sie kann, wie in Praxisfällen festgestellt, bei gleichgroßer Austrittsöffnung z. B. bei einem Gasdurchsatz von 5,8 m³ s⁻¹ ca. 0,4 m und bei einem Gasdurchsatz von 32,4 m³ s⁻¹ ca. 5,2 m betragen.

Generell muss beim Abbrennen von Gaswolken bzw. beim Brennen von drucklos oder bei unter Druck ausströmenden Gasen die Gefahr des Inbrandsetzens von benachbarten Objekten und Materialien neben einer möglichen Direktbeflammung auch infolge Wärmestrahlung der sich entwickelnden Flammen ausgegangen werden.

Bei brennenden Gasstrahlen ist in Abhängigkeit vom im Gasgemisch vorhandenen Sauerstoff von nachfolgenden Parametern der Flammen auszugehen:

Tab. 12: Flammenfortpflanzungsgeschwindigkeit in Gasen und maximale Wärmeleistungen von Flammen

Gas	Flammenfortpflanzungsgeschwindigkeit – λ in m s^{-1}	Wärmestrom der Flamme – $\dot{q}_{Fl,S}$ in $\text{kJ m}^{-2} \text{s}^{-1}$	Gehalt Sauerstoff in %
Wasserstoff	2,1	14	25
Kohlenmonoxid	0,31	2,1	21
Methan	0,29	8,4	62
Ethin	1,15	44,8	70
Propan	0,41	10,7	82
Stadtgas	0,62	12,7	42

1.4.6.4 Brände in Sauerstoff angereicherter Atmosphäre

In Bereichen, in denen Sauerstoff erzeugt, fortgeleitet bzw. bei verfahrenstechnischen Schritten eingesetzt wird, sind Brände auf Grund der Anwesenheit und der hohen Reaktivität des Sauerstoffs grundsätzlich nicht auszuschließen. Nachfolgende Ursachen für ungewollte, erhöhte Sauerstoffkonzentrationen sind zu nennen:

- Undichte Rohrverbindungen, Flansche usw.
- druckbedingtes Öffnen einer technischen Einrichtung durch den anstehenden Sauerstoffdruck
- Restmengen an unverbrauchtem Sauerstoff bei dessen Verwendung bei Schweiß- und Schneid-Verfahren
- Restmengen an unverbrauchtem Sauerstoff bei dessen Verwendung bei metallurgischen Prozessen
- Freisetzung von absorbiertem Sauerstoff (Desorption) aus Absorptionsmittel (Molsieb, Silicagel u. a.) oder Isoliermaterialien infolge Temperaturerhöhung, Auslaufen von flüssigem Sauerstoff (tiefkalte Flüssigkeit) aus Leitungen und Behältern mit anschließender Verdampfung
- Freisetzungen im Zusammenhang mit der Verflüssigung von Luft sowie
- Auftreten von erhöhten Sauerstoffkonzentrationen in der Nähe von verfahrenstechnisch vorgesehenen Sauerstoff-Ausblaseöffnungen

Erhöhte Sauerstoffkonzentrationen bewirken u. a. eine Erniedrigung bestimmter sicherheitstechnischer Kennwerte wie z. B. der Zündtemperatur, der unteren Zündgrenze (Explosionsbereich verbreitert sich auf Grund des Anstiegs der oberen Explosionsgrenze), des Flammpunktes, der Flammenfortpflanzungsgeschwindigkeit. Darüber hinaus stellt sich, bedingt durch das Fehlen bzw. durch geringe Mengen an wärmebindenden inerten Luftbestandteilen wie N_2 und CO_2 , eine intensivere Verbrennung ein, wie sich an Hand der Flammentemperatur und der Wärmefreisetzung feststellen lässt (siehe nachfolgende Tabellen). Dennoch erreichen die realen Flammentemperaturen auch in reinem Sauerstoff meist weniger als $3000\text{ }^\circ\text{C}$, da sich bedingt durch die thermische Dissoziation der Verbrennungsprodukte höhere Temperaturen nicht einstellen können. Tritt Dissoziation nicht oder nur im geringem Maße auf, d. h. bilden sich thermostabile Verbrennungsprodukte, wie bei der Verbrennung von Metallen, z. B. Metalloxide (MgO , Al_2O_3), erreichen die Flammentemperaturen $> 3000\text{ }^\circ\text{C}$.

Tab. 13: Theoretische Flammentemperaturen von CO-Luft und CO/O₂-Gemischen

CO-Konzentration in Vol.- %	theoretische Flammentemperatur in °C	
	in Luft	in O ₂
20	1.650	1.850
29,5 (C _{stöch} in Luft)	2.075	2.375
40	1.950	2.650
66,7 (C _{stöch} in O ₂)	1.725	2.930

Tab. 14: Adiabatische Flammentemperatur einiger Brenngase bei Verbrennung mit Luft bzw. Sauerstoff in °C

Brennstoff/ Mischung	Adiabatische Flammentemperatur in °C			
	bei der unteren Zünd- grenze	bei der stöchio- metrischen Ver- brennung mit Luft	bei der oberen Zünd- grenze	bei der stöchio- metrischen Verbren- nung mit Sauerstoff
Kohlenmonoxid CO	1.050	2.130	1.070	2.950
Wasserstoff H ₂	1.050	2.130		3.080
Methan CH ₄	1.050	1.970	920	2.860
Acetylen C ₂ H ₂		2.250		3.030

Erhöht sich die Sauerstoffkonzentration in der umgebenden Atmosphäre erlangen nachfolgende Zündquellen an Bedeutung:

- Offenes Feuer oder Flammen (Tabakglut, Schweißen oder andere Feuerarbeiten, Verbrennungsmotoren, Öfen etc.)
- elektrische Funken
- Schleiffunken sowie Reibungsfunken

In geschlossenen unter Druck stehenden Systemen wie Leitungen und Behälter, die Sauerstoff enthalten, sind die vorgenannten Zündquellen nicht vordergründig relevant. Zu beachten sind aber:

- Erhitzung durch adiabatische Verdichtung
- Reibung
- mechanisch erzeugte Funken (Stoßfunken)
- elektrische Funken
- hohe Geschwindigkeit des Gases bei Anwesenheit von Partikeln sowie
- Erhitzung durch Turbulenz.

Im Falle des Auströmens von reinem Sauerstoff sind Textilien besonders brandgefährdet z. B. auch Arbeitsschutzkleidung. Die Erhöhung der Flammenausbreitungsgeschwindigkeit (Ausbreitungsgeschwindigkeit der Flammenfront über die Materialoberfläche) verdeutlicht die nachfolgende Abbildung.

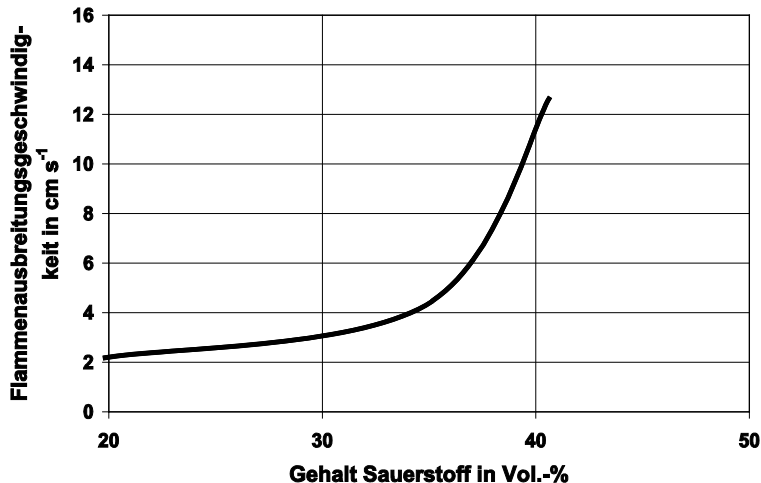


Abb. 26: Flammenausbreitung in Abhängigkeit von der Sauerstoffkonzentration

Die Abb. 26 verdeutlicht den Trend der Flammenausbreitung auf einem textilen Material bei steigender Sauerstoffkonzentration. Ähnliche Verläufe sind auch für andere Materialien, wie z. B. für Kunststoffe zu erwarten. Öle und Fette zünden in strömenden und insbesondere in komprimiertem Sauerstoff sofort und können im weiteren Verlauf Metallbrände z. B. an Leitungen und Armaturen auslösen. Wegen der leichten Entzündlichkeit bzw. der Gefahr einer Selbstentzündung sind in sauerstoffführenden Leitungen und Armaturen keine Dichtungen und Packungen zulässig, die aus organischen Materialien bestehen. Eine Zündung kann insbesondere in strömendem Sauerstoff begünstigt werden, wenn durch mitgeführte Feststoffpartikel (z. B. Rost, Walzzunder) infolge Reibung Wärme entsteht. Auch Wärmeisolierungen an Anlagen der Luftverflüssigung, die aus Mineralwolle bestehen und die mit Binde- oder Schmälmitteln zur Faserfixierung ausgerüstet ist, können sich in Verbindung mit Sauerstoff selbst entzünden. Aus diesem Grund dürfen die Gehalte an diesen duroplastischen Kunststoffklebharzen 1 Gew.-% nicht überschreiten. Kabel mit PVC-Isolierungen verbrennen in reinem Sauerstoff mit einer verpuffungsartigen Geschwindigkeit.

1.5 Kenngrößen zur Charakterisierung des Brandverlaufes

Unter den wesentlichen Kenngrößen zur Charakterisierung des Brandverlaufes werden die nachfolgend aufgeführten messbaren Größen verstanden. Dies sind:

- Abbrandgeschwindigkeit
- Brandausbreitungsgeschwindigkeit
- Flammentemperatur bzw. Brandtemperatur
- Temperaturverlauf
- Wärmestrom des Brandes
- Wärmestromdichte
- Rauchdichte

1.5.1 Heizwert

Der Heizwert, auch als Verbrennungswärme bezeichnet, ist im eigentlichen Sinne keine Kenngröße zur Charakterisierung des Brandverlaufes. Gemessen aber an seiner grundsätzlichen Bedeutung hinsichtlich der Beurteilung der energetischen Relationen von Verbrennungsprozessen wird nachfolgend auch auf diese Kenngröße eingegangen. Der **Heizwert** ist die Energie, die bei vollständiger Verbrennung abgegeben wird, d. h. wenn Rauch- oder Abgas bei konstantem Druck bis auf die Bezugstemperatur zurückgekühlt werden. Der aus der Verbrennung entstandene Wasserdampf bleibt aber hierbei dampfförmig. Früher wurde dieser Wert als unterer Heizwert H_U bezeichnet.

Nach der Verbrennung wird die Kondensationswärme nicht an die Umgebung abgegeben.

$$H_U = \frac{\Delta H_R}{M} - r_{\text{WH}_2\text{O}} \quad (30)$$

$r_{\text{WH}_2\text{O}}$ - spezifische Kondensationswärme des Wassers bei 25 °C = 2,442 kJ kg⁻¹

Der **Brennwert** ist die Energie, die bei vollständiger Verbrennung abgegeben wird, wenn das Abgas bei konstantem Druck bis auf die Bezugstemperatur zurückgekühlt wird. Der Brennwert umfasst somit auch die durch Kondensation des entstandenen Wasserdampfes freiwerdende Energie (**Kondensationswärme**). Dieser Wert wurde früher als oberer Heizwert H_O bezeichnet. Der Brennwert ist der Quotient aus der bei vollständiger Verbrennung freiwerdenden negativen Reaktionsenthalpie $-\Delta H_R$ und seiner Masse M

$$H_O = \frac{\Delta H_R}{M} \quad (31)$$

Der Brennwert wird im Bombenkalorimeter nach DIN 51900 bestimmt und ist auf folgende Bedingungen bezogen: Die Temperaturen T_{Anfang} und T_{Ende} betragen 298 K bzw. $t = 25^\circ\text{C}$ und das Wasser liegt vor und nach der Verbrennung in flüssigem Zustand vor.

Für brennbare Gase gilt:

$$H_U = H_O - r_N \cdot \chi_{\text{H}_2\text{O}} \quad (32), \text{ wobei}$$

- Wasserdampf auf den gasförmigen Zustand bei Normalbedingungen umgerechnet wird (mit einer theoretischen Dichte von 0,815 kg m⁻³) und
- r_N entspricht der auf das Volumen bei Normalbedingungen bezogenen Kondensationswärme von Wasserdampf bei 25 °C = 1,990 kJ m⁻³

Alle Heizwertangaben beziehen sich auf die Wärmemenge, die bei der vollständigen Verbrennung von 1 kg Feststoff oder Flüssigkeit bzw. 1 m³ Gas freigesetzt wird, wobei das Verbrennungsprodukt Wasser definitiv als Flüssigkeit vorliegt. Bei Wasserstoff enthaltenden Verbindungen ist der Betrag für die Verbrennungswärme gegenüber dem Betrag des Heizwertes H_U umso größer, je höher der Wasserstoffanteil ist.

1.5.2 Flammentemperatur

Die Flammentemperatur wird in der technischen Verbrennungslehre auch als Verbrennungstemperatur bezeichnet. Im Zusammenhang mit Bränden wird häufig der Begriff der Brandtemperatur benutzt. Weiterhin ist die Flammentemperatur eine Kennzahl, die im Sinne der Temperaturdefinition ein Maß für den Wärmezustand einer Flamme darstellt. Flammentemperaturen lassen sich nur näherungsweise berechnen. So stehen für die Beurteilung von technischen Verbrennungsprozessen mehrere, in unterschiedlicher Weise definierte, charakteristische Temperaturen zur Verfügung, die stets von den wirk-

lichen in den Verbrennungsräumen auftretenden Temperaturen zu unterscheiden sind. Jede dieser charakteristischen Temperaturen hat nur eine begrenzte Aussagefähigkeit. Zu nennen sind:

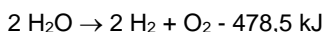
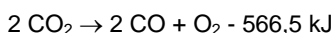
T_{Freal} - die reale Flammentemperatur oder Verbrennungstemperatur in K (Im Weiteren für die BUE am wichtigsten)

T_{Fkolor} - die kalorische (kalorimetrische) Flammentemperatur in K

T_{Ftheor} - die theoretische (auch adiabatische) Flammentemperatur in K

Zur Beschreibung der in Verbrennungsräumen ablaufenden Verbrennungsprozesse ist zwischen kalorischer und theoretischer Verbrennungstemperatur zu unterscheiden. Wird ein Brennstoff mit Luft in einer adiabaten Brennkammer (es werden keine Wärmeverluste zur Umgebung angenommen) verbrannt, so stellt sich in dem entstandenen Verbrennungsgas die kalorische Verbrennungstemperatur ein, nachdem sich alle brennbaren Bestandteile des Brennstoffes in ihre höchste Oxidationsstufe, also im Regelfall vor allem zu H_2O und CO_2 , umgesetzt haben. Die kalorische Flammentemperatur kann so hoch sein, dass dabei schon eine Dissoziation stattfindet, d.h. die Reaktion verläuft nicht vollständig in Richtung der vorgenannten Endprodukte. Daher ist die kalorische Flammentemperatur ein rein theoretischer Wert. Bei der Bestimmung der adiabatischen Flammentemperatur wird die Verbrennungswärme um die Verbrennungsenergie der Dissoziationsprodukte gemindert, da bei Temperaturen $> 1500\text{ °C}$ die Verbrennungsreaktionen nicht vollkommen in Richtung der Endprodukte verlaufen, so dass CO und H_2 als reaktionsfähige Verbindungen erhalten bleiben. Zu ihrer Berechnung werden demnach auch die Dissoziationsgleichgewichtskonstanten und die Stoffdaten der Dissoziationsprodukte benötigt. Die in diesen Dissoziationsprodukten noch gebundene Wärmemenge, die Dissoziationswärme, vermindert die kalorische Verbrennungstemperatur.

Zum Beispiel:



Dissoziationen werden erst oberhalb von 1700 °C merklich. Deshalb sind die theoretischen Flammentemperaturen bis zu 1700 °C mit den kalorischen Flammentemperaturen nahezu identisch. Oberhalb dieser Temperatur sind die Werte von T_{Ftheor} niedriger als die von T_{Fkolor} .

Die Verbrennungstemperatur berücksichtigt neben der Dissoziation die Wärmeabgabe der Flamme, die überwiegend durch Flammenstrahlung stattfindet. Die Verbrennungstemperatur hängt demnach nicht nur von den Stoffdaten des Brennstoffs und des Abgases sondern auch von der Konstruktion des Brenners und dem Feuerraum (bei Schalenfeuern ist dies der Brandraum) ab.

Die Verbrennungstemperatur wird von der Flammengröße (Brennerleistung) stark beeinflusst. Bei sonst gleichen Bedingungen vermindert sich die Verbrennungstemperatur mit

abnehmender Brennerleistung. Die Verbrennungstemperatur ist stets niedriger als jede der vorgenannten Flammentemperaturen.

Weiterhin hängt sie z. B. von der Art des Brennstoffes, der Verbrennungseinstellung und der Luftvorwärmung ab und dient in erster Linie zur Charakterisierung eines bestimmten Verbrennungsprozesses. In Verbrennungsräumen technischer Anlagen kann weder die kalorische noch die theoretische Verbrennungstemperatur erreicht werden, da das als Flamme bezeichnete brennende Brennstoff/Luft-Gemisch schon während der Verbrennung Wärme sowohl an das Brennstoff/Luft-Gemisch als auch an die Wände abgibt. Zur Charakterisierung dieses kombinierten Vorganges von Verbrennung und Wärmeübertragung hat es sich deshalb als zweckmäßig erwiesen, eine tatsächliche Temperatur t_{tat} in Grad C für das Verbrennungsgas zu definieren, die man auch als Bilanztemperatur bezeichnen kann. Temperatur erhöhend wirken sich eine Vorwärmung der Verbrennungsluft oder aber auch des Brennstoffes aus. Ebenfalls erhöhend auf die Verbrennungstemperatur wirkt sich ein Zusatz von reinem Sauerstoff zur Verbrennungsluftmenge aus. Welchen Einfluss die vorherige Erwärmung des Brennstoff-Luftgemisches auf die erreichbare Flammentemperatur hat, zeigt die nachfolgende Abbildung.

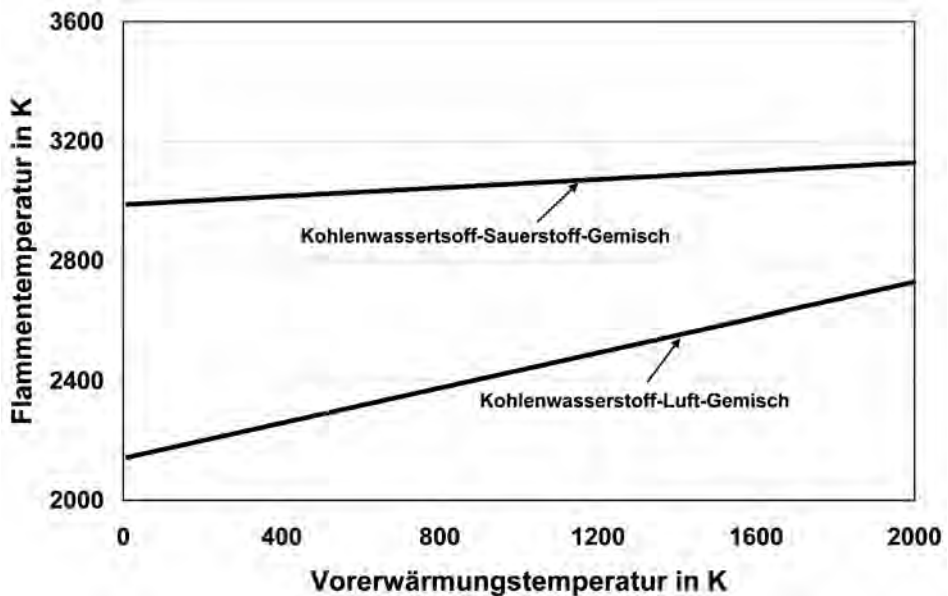


Abb. 27: Abhängigkeit der Flammentemperatur (T_F) eines stöchiometrischen Kohlenwasserstoff-Luftgemisches und eines Kohlenwasserstoff- O_2 -Gemisches von der Vorheiztemperatur

Den Einfluss der Brandstoffkonzentration verdeutlicht die nachfolgende Abbildung. Erkennbar ist eine maximale Temperatur im Bereich der stöchiometrischen Konzentration und die Abhängigkeit der Temperatur von der jeweiligen Brennstoffkonzentration.

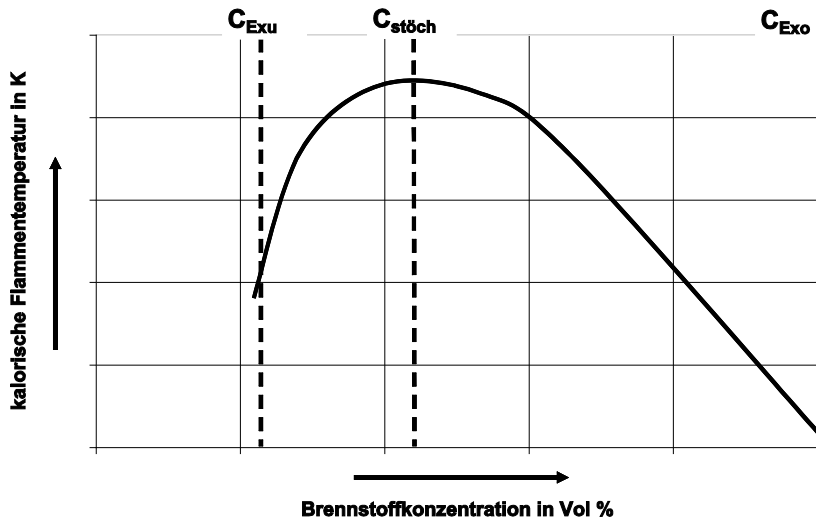


Abb. 28: Schematische Darstellung der Abhängigkeit der max. Flammentemperatur t_{Fkalor} von der Konzentration eines Brennstoffes in einem Brennstoff-Luft-Gemisch

Die Flammentemperatur erreicht ihren Maximalwert etwas oberhalb der stöchiometrischen Konzentration und Minimalwerte an der oberen und unteren Explosionsgrenze. Die niedrigste Flammentemperatur ergibt sich dabei für die Konzentration an der oberen Explosionsgrenze.

Eine Senkung der Verbrennungstemperatur wird auch durch eine Vergrößerung der zugeführten Luftmenge über das benötigte Maß hinaus bewirkt. Zur Abschätzung der Flammentemperatur mittels Interpolation werden sogenannte h,t -Diagramme benutzt (Verhältnis von Wärmeinhalt der Verbrennungsabgase zur Temperatur der Abgase).

Grundsätzlich gilt: Die in der Verbrennungszone freigesetzte Wärme wird auf die Verbrennungsprodukte übertragen, wodurch sich diese auf hohe Temperaturen erwärmen. Bei vorgemischten Systemen treten deutlich höhere Werte für T_{Freal} auf als innerhalb der Flamme eines Brandes. Dies ist dadurch zu erklären, da bei einer Schadenfeuerflamme eine Vermischung mit der Umgebungsluft mittels Diffusion notwendig ist. Die Diffusion als geschwindigkeitsbestimmender Schritt verläuft aber gerade in Schadenfeuerflammen nicht bis zur Stufe einer vollkommenen Vermischung, die dem stöchiometrischen Verhältnis entspricht, und bedingt eine langsamere Verbrennungsgeschwindigkeit und damit eine geringere Flammentemperatur. Die höheren Temperaturen bei vorgemischten Flammen mit einer vergleichsweise guten Vermischung resultieren aus der sehr kurzen Verbrennungsdauer und bedingt durch ihre Anordnung in Verbrennungsräumen eine vergleichsweise eingeschränkten Wärmeabgabe an die Umgebung. Weitere Aussagen zu Temperaturen in vorgemischten Flammen – siehe auch Abschnitt 4.7.

Einen Vergleich zwischen kalorischen und realen Flammentemperaturen zeigen die nachfolgende Tabelle 15 sowie die Tabelle 37 – Anhang.

Tab. 15: Flammentemperaturen einiger Brandstoffe

Brandstoff	$\theta_{F_{kolor}}$ in °C	$\theta_{F_{real}}$ in °C
Ottokraftstoff	2.082	1.200
Petroleum	2.087	1.100
Dieselmkraftstoff	2.125	1.100
Holz	1.600	1.080

Wie ersichtlich, liegt die reale Flammentemperatur $\theta_{F_{real}}$ etwa um 30 bis 50 % niedriger als die kalorische Flammentemperatur $\theta_{F_{kolor}}$.

In der Literatur vorgeschlagene Abschätzungen für reale Flammentemperatur, wie z. B. in Form der folgenden Näherungsgleichung, liefern eher selten zufriedenstellende Ergebnisse und sollten mit Vorsicht angewendet werden. In dem Faktor, nachfolgend 0,74, sollen solche Einflussgrößen wie der Verbrennungswirkungsgrad sowie die Wärmeverluste an die Umgebung ausgedrückt werden.

$$\theta_{F_{real}} = \theta_0 + 0,74 \cdot \theta_{F_{kolor}} \quad (33),$$

wobei θ_0 - Umgebungstemperatur ist

1.5.3 Temperaturen bei einem Brand in einem Raum

Bei einem Brand in einem Raum sind die gemessenen Brandraumtemperaturen weder mit der realen Flammentemperatur $\theta_{F_{real}}$ noch insbesondere mit den vorher beschriebenen Flammentemperaturen identisch. Die mittleren Brandraumtemperaturen (auf die eigentliche Temperaturverteilung im Raum wird unter Punkt 1.6 eingegangen) ändern sich in Abhängigkeit von der Zeit und sind von solchen Bedingungen wie der Art und Menge des brennbaren Materials, den Lüftungsverhältnissen, der Raumgröße u. a. abhängig. Zur Beschreibung des Prozesses einer stetigen Änderung der Brandraumtemperatur in Abhängigkeit von der Zeit wurde der Begriff Temperaturverlauf eingeführt. Die nachfolgende Abbildung zeigt den Temperaturverlauf beim Abbrand von 4 unterschiedlichen Brandstoffen mit gleicher Brandlast, wie er sich in einem Raum unter stets gleichen Versuchsbedingungen darstellt. Es ist ersichtlich, dass die mittlere Temperatur im Verlauf von 25 bis 45 Minuten ein Maximum erreicht und danach langsam wieder absinkt. Wenngleich die vorgenannten Zeitintervalle für die gewählten Versuchsbedingungen stehen, so ist dieser Verlauf der Brandraumtemperatur vor allem auf die durch den Stoffumsatz (Verbrennung) bedingte Wärmefreisetzung sowie die Wärmeverluste zurückzuführen, die sich durch Wärmeabführungen über die bauliche Hülle und die Lüftungsöffnungsfläche ergeben. Mit einer Vergrößerung der Brandfläche und der Brandlast, verbunden mit höheren Abbrandgeschwindigkeiten, ist mit einem zunehmenden „Wärmeüberschuss“ zu rechnen, was neben einer Erhöhung der mittleren Brandraumtemperatur auch zum Erreichen der Maximaltemperatur zu einem früheren Zeitpunkt führt. Die Höhe des Maximums der mittleren Brandraumtemperatur ist bei vergleichbaren Bedingungen, wie in Abbildung 31 ersichtlich und wie unter Pkt. 1.5.6 ausgeführt wird, proportional dem Heizwert der Brandstoffe. Das heißt, je höher der Heizwert, umso höher das Temperaturmaximum.

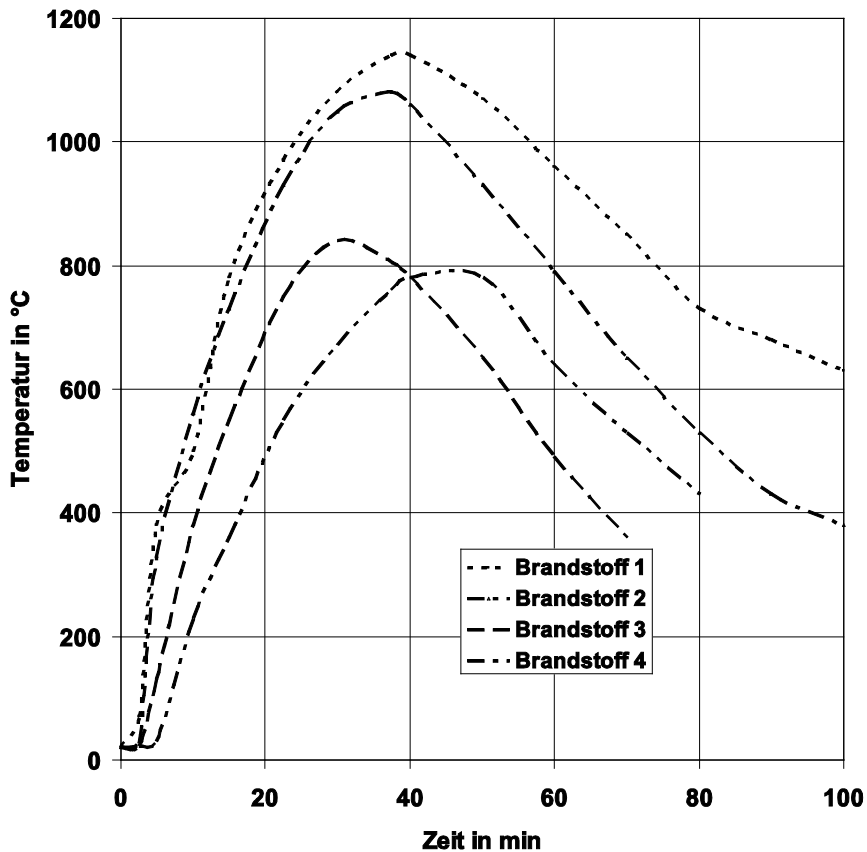


Abb. 29: Brandraumtemperatur in Abhängigkeit von der Branddauer beim Abbrand gleicher Brandstoffmengen mit unterschiedlichen Heizwerten sowie Abbrandgeschwindigkeiten - schematisch

Unter Berücksichtigung von in der Praxis in Räumen zu erwartenden Brandlasten, deren Abbrandgeschwindigkeiten sowie Heizwerten und weiteren Randbedingungen kann von den in der Tabelle 16 angegebenen maximalen Brandraumtemperaturen ausgegangen werden.

Im Sinne des bautechnischen Brandschutzes wird unter der Brandlast Q in MJ die Summe der Verbrennungswärmen (weiteres siehe Heizwert) sämtlicher, in einem bestimmten Raum bzw. Objekt enthaltenen brennbaren Stoffe, inklusive der Verkleidungen von Decken, Fußböden, Wänden und Trennwänden verstanden (Masse an Brandstoffen). Brandlast bzw. Verbrennungswärme hängen in hohem Maße von der Art, Beschaffenheit und chemischen Zusammensetzung der brennbaren Materialien ab. Bezieht man die Brandlast eines Raumes oder Abschnitts auf seine Grundfläche, so erhält man die Brandlastdichte q in $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$, auch Brandbelastung genannt, welche als Vergleichsmaß bei der Bewertung der Brandbelastung von Gebäuden herangezogen wird.

Tab. 16: Maximale Brandraumtemperaturen in der Praxis

Brandszenario	maximale Brandraumtemperaturen in °C
Wohnungen und Verwaltungsgebäude	1.000 bis 1.100
Theater, Kaufhäuser	1.000 bis 1.200
Treib- und Schmierstoffe in Produktionsgebäuden/-lagern sowie Gummi und Kautschuk z. B. in Reifenfabriken/-lagern	ca. 1.300

Weiteres siehe Kapitel 1.6 Brände in Räumen

1.5.4 Abbrandgeschwindigkeit

Grundsätzlich ist unter dem Abbrand die durch den Verbrennungsprozess bedingte Masseabnahme des Brennstoffes zu verstehen. Unter Abbrandgeschwindigkeit versteht man die pro Zeiteinheit verbrennende Masse oder das pro Zeiteinheit verbrennende Volumen des Brandstoffs, jeweils bezogen auf die brennende Brandstoffoberfläche. Daraus resultieren die für die Abbrandgeschwindigkeit häufig benutzten Termini wie Massenabbrandgeschwindigkeit oder auch *spezifische* Abbrandgeschwindigkeit \dot{m}'' (Dimensionen $\text{kg m}^{-2} \text{min}^{-1}$) bzw. Volumenabbrandgeschwindigkeit (Dimension $\text{m}^3 \text{m}^{-2} \text{min}^{-1}$). Teilweise wird für die spezifische Abbrandgeschwindigkeit als Symbol auch $V_{ab, spez}$ benutzt.

Für die Massenabbrandgeschwindigkeit gilt die Beziehung:

$$\dot{m}'' = \frac{m_{Bst}}{t_{Brd} \cdot A_{Brd}} \quad (34)$$

\dot{m}'' - Massenabbrandgeschwindigkeit in $\text{kg m}^{-2} \text{min}^{-1}$

m_{Bst} - Masse Brandstoff in kg

t_{Brd} - Zeitdauer des Brandes in min

A_{Brd} - Brandfläche in m^2

Als Brandfläche wird in vereinfachter Weise die von der Fläche der Flamme erfasste brennende Stoffoberfläche (projizierte Fläche) angenommen. Diese Annahme gilt in dieser Form aber nur für ebene Flächen wie in Form von Poolbränden, schmelzenden Feststoffen u. ä.

Der Bezug auf die Brandstoffoberfläche erweist sich insbesondere bei nicht schmelzenden Feststoffen insofern als schwierig, als derartige Stoffe im Brandfall in verschiedenen Verteilungszuständen mit sehr unterschiedlichen Oberflächen in Erscheinung treten und diese Oberfläche nicht oder nur ungenau abgeschätzt werden kann. Dennoch ist der Bezug auf die Brandstoffoberfläche insofern zielführend, weil auf der Oberfläche (konkret

vor allem in der obersten Brennstoffschicht) die langsamsten und damit die geschwindigkeitsbestimmenden Vorgänge für den Stofftransport in Richtung Flamme ablaufen. Das sind die Verdampfung und/oder die Pyrolyse und insbesondere bei Feststoffen auch Diffusion und Permeation der Pyrolyseprodukte.

Als lineare Abbrandgeschwindigkeit wird die Höhenänderung der pro Zeiteinheit abbrennenden Brandstoffschicht (Dimension m min^{-1}) bezeichnet. Die Massenabbrandgeschwindigkeit steht zur linearen Abbrandgeschwindigkeit in Beziehung:

$$\dot{m}_m'' = v_{lin} \cdot \rho_{Bst} \quad (35)$$

\dot{m}'' - Massenabbrandgeschwindigkeit in $\text{kg m}^{-2} \text{ min}^{-1}$

v_{lin} - lineare Abbrandgeschwindigkeit in m min^{-1}

ρ_{Bst} - Dichte des Brandstoffs in kg m^{-3}

Nachfolgendes Beispiel soll den Zusammenhang zwischen Massenabbrandgeschwindigkeit und linearer Abbrandgeschwindigkeit verdeutlichen:

In einem Tank mit einem Durchmesser von ca. 2,50 m brennt eine brennbare Flüssigkeit. Die brennbare Flüssigkeit, hier konkret Aceton, besitzt eine Dichte von $\rho = 0,8 \text{ g m}^{-3}$. Der Abbrand vollzieht sich dergestalt, dass das Flüssigkeitsniveau innerhalb von 32 min um 10 cm sinkt. Daraus ergibt sich für $\dot{m}'' = 2,4 \text{ kg m}^{-2} \text{ min}^{-1}$, für die Volumendichte ergibt sich ein Betrag $= 3,125 \text{ l m}^{-2} \text{ min}^{-1}$. Die lineare Abbrandgeschwindigkeit v_{lin} beträgt $0,3 \text{ cm min}^{-1}$. In Hinblick auf die Tatsache, dass insbesondere brennbare feste Stoffe nur selten in Form einer ebenen Brandstofffläche vorzufinden sind, wird aus praktischen Gründen, wie z. B. der Berechnung der Kräfte und Mittel bei Feuerwehreinsätzen zur Brandbekämpfung, eine relative Abbrandgeschwindigkeit angegeben. Diese relative Abbrandgeschwindigkeit bezieht sich nicht auf die Brandstoffoberfläche, sondern auf die Basisfläche des Brandes. Zwischen beiden besteht die Beziehung:

$$\dot{m}_{rel}'' = \frac{\dot{m}'' \cdot A_s}{A_{Brd}} = \dot{m}'' \cdot k_Q \quad (36)$$

\dot{m}_{rel}'' - relative Abbrandgeschwindigkeit in $\text{kg m}^{-2} \text{ min}^{-1}$

\dot{m}'' - Massenabbrandgeschwindigkeit in $\text{kg m}^{-2} \text{ min}^{-1}$

A_s - Brandstoffoberfläche in m^2

A_{Brd} - Basisfläche des Brandes in m^2

k_Q - Oberflächenkoeffizient $= A_s / A_{Brd}$

Der Koeffizient kann im hohen Maße variieren, so beträgt er z. B. für Holzstämme 2 und für Bretterstapel 16. Daraus leitet sich die Aussage ab, dass ein Bretterstapel eine 8-fach größere Oberfläche in Form einer inneren Oberfläche aufweist als ein Stapel mit Baumstämmen. Dieser Sachverhalt wirkt sich natürlich hinsichtlich des Abbrandverhaltens verstärkend aus. Somit ist ein Vergleich des Abbrandverhaltens fester Stoffe hinsichtlich ihrer Abbrandgeschwindigkeit, wie vorgenannt, nur bei gleichem Oberflächenkoeffizienten sinnvoll.

Eine weitergehende Bedeutung besitzt die Abbrandgeschwindigkeit auch für die Berechnung der Branddauer bei Schadenfeuern, für die Abschätzung des Luftbedarfes und der Rauchgasfreisetzung (Verbrennungsprodukte) sowie insbesondere für eine Abschätzung der Intensität der Wärmefreisetzung.

1.5.4.1 Einflussgrößen für die Abbrandgeschwindigkeit

Die experimentelle Bestimmung der Abbrandgeschwindigkeit als eine wesentliche Stoffgröße zur Charakterisierung des Brandverhaltens brennbarer Stoffe setzt die Festlegung wesentlicher Randbedingungen voraus, um verwertbare Ergebnisse zu erhalten. Das betrifft vor allem solche Randbedingungen wie die anfängliche Stofftemperatur, dem Behälterdurchmesser bei brennbaren Flüssigkeiten oder die Abmessung der Brandfläche bei festen Stoffen, die Luftgeschwindigkeit, die Lüftungsverhältnisse bei Bränden in Räumen u. a. So steigt, wie vorgenannt, mit zunehmender Ausgangstemperatur des Brandstoffs der Betrag der Abbrandgeschwindigkeit. So wäre eine Festlegung der Ausgangstemperatur von 20 °C im Sinne einer Normierung der Abbrandgeschwindigkeit sehr hilfreich, doch werden derartige Informationen für die Versuchsbedingungen bei Literaturangaben kaum gefunden.

So stellen, wie schon bei der Charakterisierung von Flammen ausgeführt, die Größe des Behälterdurchmessers bei Flüssigkeiten bzw. die Geometrie und die Abmessungen der Brandstoffoberflächen bei Feststoffen eine wesentliche Randbedingung dar, weil durch die Größe der Brandfläche u. a. der Auftrieb und damit der Strömungscharakter der brandbedingten Auftriebsströmung und damit die Flammenform wesentlich beeinflusst werden.

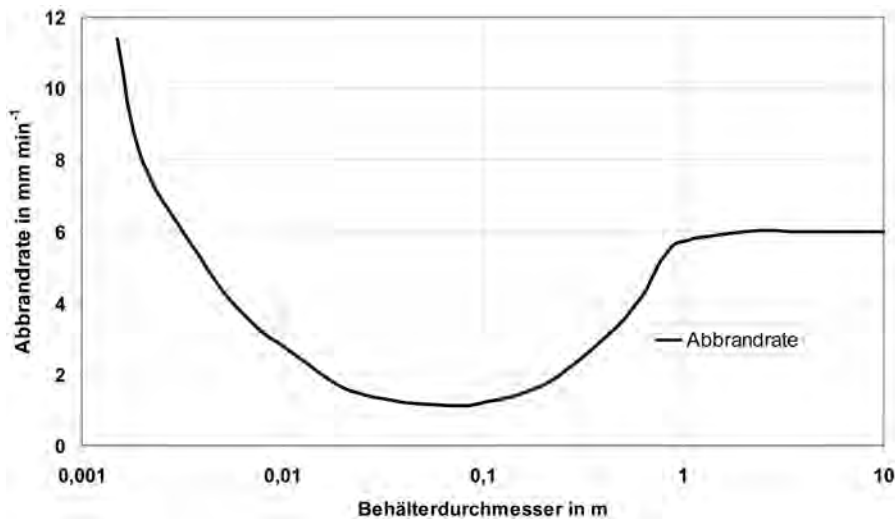


Abb. 30: Schematische Darstellung der Abhängigkeit der linearen Abbrandgeschwindigkeit flüssiger Brandstoffe wie Kohlenwasserstoffe vom Behälterdurchmesser [1.10]

Aus Abbildung 30 ist ersichtlich, dass die Abbrandgeschwindigkeit brennbarer Flüssigkeiten bei sehr kleinen Durchmessern zwar hohe Beträge aufweist, aber mit zunehmendem Durchmesser sinkt die Abbrandgeschwindigkeit und erreicht bei einem Durchmesser von ca. 0,1 m ein Minimum. Der Hauptgrund für diese Abnahme besteht vor allem in der sich verringernenden Wärmerückführung aus der Flamme auf die Brandstoffoberfläche und einer geringer werdenden Wärmezufuhr zur Behälterwand, die sich in Form von Wärmeleitung vollzieht. Im Bereich von einem Durchmesser 0,1 m bis 1,3 m steigt die Abbrandgeschwindigkeit wieder an und erreicht ab einem Behälterdurchmesser von $> 1,3$ m einen konstanten Betrag. Die im Bereich mit einem Behälterdurchmesser bis 0,02 m existierenden Flammen weisen einen laminaren Strömungscharakter auf. Für diesen Bereich gilt es insbesondere anzumerken, dass die eigentliche Verbrennung in der Grenzschicht zwischen Umgebungsluft und Brennstoffdampf stattfindet und sich auf die dabei vorliegende Diffusionsschicht beschränkt. Im Bereich von Durchmessern zwischen 0,02 m bis 0,80 m existieren Flammen mit einem gemischten Strömungscharakter (laminar/turbulent). So zeigen sich ab $d > 0,1$ m im oberen Teil der Flamme Formänderungen in Form von Pulsationserscheinungen und in einem Aufteilen der Flammenspitze in Teilflammen. Ab diesem Bereich kommt es auch im verstärkten Maße zu einer Vermischung von Brennstoffdampf und Luft sowie einer anschließenden Verbrennung innerhalb der Flamme. Dies führt zur Vergrößerung der Wärmezufuhr von der Verbrennungszone zur Flüssigkeit und folglich zur Erhöhung der Abbrandgeschwindigkeit. Im Bereich einer nahezu rein turbulenten Strömung der Brandstoffdämpfe bei Durchmessern > 1 m bleibt der Wärmestrom, der pro Flächeneinheit der Flüssigkeitsfläche übertragen wird, nahezu konstant und deshalb ändert sich auch die Abbrandgeschwindigkeit nicht mehr – siehe Tabellen 39, 48 und 49 – Anhang. Für eine Reihe von Feststoffen wie insbesondere den Thermoplasten kann bei Vorliegen einer horizontalen Brandstoffoberfläche davon ausgegangen werden, dass die Abbrandgeschwindigkeit bei Flächen $> 0,5$ m², wie bei den brennbaren Flüssigkeiten beschrieben, ebenfalls konstant bleibt – siehe nachfolgende Abbildung.

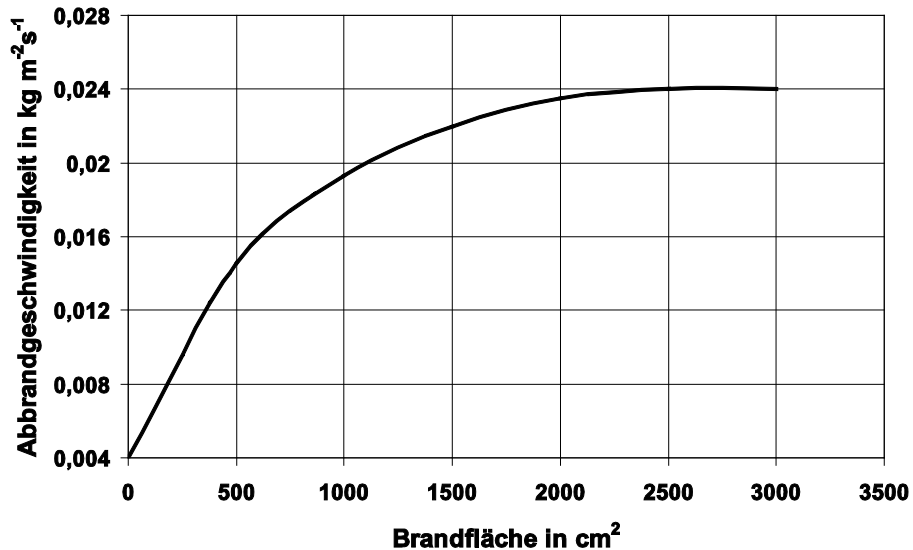


Abb. 31: Abbrandgeschwindigkeit eines Schaumkunststoffs in Abhängigkeit von der Brandfläche

Die vorgenannten Feststellungen gelten nur für Brände im Freien und in ruhender Luft. Bei Bränden in Räumen gelten diese Aussagen nur solange, wie der Brand brandstoffgesteuert (auch brandlastgesteuert) verläuft. Brandlastgesteuert verlaufen Brände in Räumen grundsätzlich in der Brandentstehungsphase. Im Zuge der weiteren Brandentwicklung erlangen die Raumöffnungen eine zunehmende Bedeutung, weil sich über diese Öffnungen der notwendige Frischlufteintrag und auch der Rauchgasaustrag vollziehen. Ab dem Zeitpunkt, ab dem die Raumöffnungen einen nachhaltigen Einfluss auf den Brandverlauf ausüben, verlaufen die Brände ventilationsgesteuert (siehe auch Pkt.1.6).

Eine weitere Einflussgröße auf die Abbrandgeschwindigkeit stellt die Luftströmung dar. Wie schon im Zusammenhang mit der Flammengröße beschrieben, kann eine seitliche Luftströmung eine Flammenneigung bewirken. Dies gilt insbesondere für den Fall, wenn die vertikal gerichtete Auftriebsströmung der Flamme durch eine entsprechend starke horizontal gerichtete Seitenströmung abgelenkt werden kann. Neben diesem Neigungseffekt wird darüber hinaus der Flamme und damit dem Reaktionsbereich der Verbrennung im verstärktem Maße auch das Oxydationsmittel Luft zugeführt, was zu einer Verbesserung der Verbrennungsbedingungen beitragen und damit zu einer Erhöhung der Abbrandgeschwindigkeit führen kann. So wird unter Punkt 1.4.6.2 bemerkt, dass bei Poolbränden Seitenwinde zu einer Erhöhung der Abbrandgeschwindigkeit führen. Diese Feststellung konnte bei der experimentellen Bestimmung der Abbrandgeschwindigkeit von Kunststoffen bestätigt werden. In welchem Maße sich seitliche Luftströmungen auf das Abbrandverhalten auswirken, zeigt die Abbildung 32.

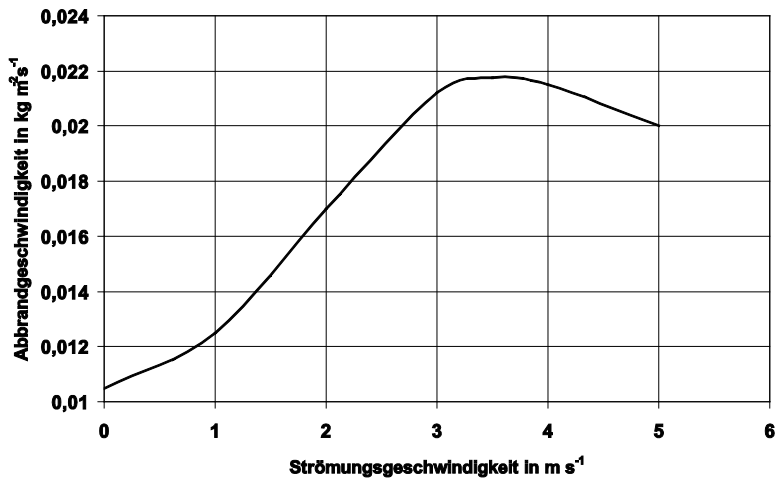


Abb. 32: Abbrandgeschwindigkeit einer Schaumkunststoffs in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit des auftreffenden Luftstroms

Eine Möglichkeit zur Bestimmung von Abbrandgeschwindigkeiten besteht neben der Durchführung von Untersuchungen im Realmaßstab in der Benutzung des Cone-Kalorimeters nach ISO 5660 bzw. in modifizierter Form, wie es z. B. für die Untersuchung des Abbrandverhaltens von Brandlasten benutzt wird. In diesem Zusammenhang wird vor allem von der Möglichkeit Gebrauch gemacht, die Abbrandgeschwindigkeit unter lüftungsgesteuerten Bedingungen im Vergleich zu normalen Brandbedingungen sowie mit einer reduzierten Luft-(Sauerstoff-)zuführung zu bestimmen. Die Beurteilung des Brandverhaltens mittels der Methode des Cone-Kalorimeters stellt insofern eine komplexe Prüfmethode dar, weil hierbei sowohl das Brandverhalten einzelner Werkstoffe wie Baumaterialien, Ausbaumaterialien und Ausrüstungen als auch deren Brandkenngrößen, wie die Abbrandgeschwindigkeit, die Rauchfreisetzungsrates, die Rauchgaszusammensetzung, des Sauerstoffgehaltes der Verbrennungsluft, die Wärmefreisetzung, der Einfluss externer Wärmequellen u. a. bestimmt werden können. Das Grundprinzip des Cone-Kalorimeters basiert auf der empirischen Feststellung, dass die bei einem Brand jedes zu untersuchenden Stoffes freiwerdende Wärmemenge direkt proportional zu der für die Verbrennung notwendigen Sauerstoffmenge ist. Der Name Cone-Kalorimeter ist vor allem auf die Form des konischen Heizungselements zurückzuführen, dass eine externe Wärmezuführung bis zu einer Wärmestromdichte von 100 kW m^{-2} im Test ermöglicht.

1.5.4.2 Berechnung der Abbrandgeschwindigkeit

Grundsätzlich lassen sich Abbrandgeschwindigkeiten von brennbaren Flüssigkeiten und auch von Feststoffen berechnen, wengleich dies für Feststoffe nur im eingeschränkten Maße gilt. Der Hauptgrund für die Einschränkungen bei Feststoffen besteht neben dem Mangel an wesentlichen Ausgangsinformationen zum Brandstoff insbesondere zu verlässlichen kalorischen Daten zur Pyrolyse/Zersetzung sowie im Fehlen eines geeigneten Rechenmodells. Aus diesem Grund wird die Abbrandgeschwindigkeit von festen Stoffen

vor allem experimentell ermittelt. Für brennbare Flüssigkeiten gibt es mehrere Berechnungsmöglichkeiten, wobei bei fast allen Modellen vor allem das Verhältnis zwischen Verbrennungswärme und Verdampfungswärme zu Grunde gelegt wird [1.1], [1.5], [1.12]. Für alle diese Vorschläge gilt grundsätzlich, dass sie für die Berechnung der Abbrandgeschwindigkeit von Bränden brennbarer Flüssigkeiten in tankähnlichen Behältern mit einem Behälterdurchmesser $>1,3$ m gelten, d. h., Brand im Freien unter turbulenten Bedingungen.

Diese werden nachfolgend beispielhaft dargestellt:

$$\dot{m}'' = \frac{a \cdot (\theta_{Fkolor} - \theta_{Sied}) \cdot M}{\left[H_{Verd} + \bar{c}_p (\theta_{Sied} - \theta_A) \right] \cdot 1000} \quad (37)$$

Es bedeuten:

\dot{m}'' - Massenabbrandgeschwindigkeit der Flüssigkeit in $\text{kg m}^{-2} \text{min}^{-1}$

a - Faktor für den Wärmeübergang von der Flamme zur Flüssigkeit = $15,048 \text{ kg m}^{-2} \text{min}^{-1}$

θ_{Fkolor} - kalorische Flammentemperatur in $^{\circ}\text{C}$

θ_{Sied} - Siedetemperatur in $^{\circ}\text{C}$

M - Molmasse in g mol^{-1}

H_{Verd} - molare Verdampfungsenthalpie in J mol^{-1}

c_p - mittlere molare spezifische Wärme der Flüssigkeit im Intervall t_A bis t_{Siede} in $\text{J mol}^{-1} \text{K}^{-1}$

θ_A - Ausgangstemperatur der Flüssigkeit in $^{\circ}\text{C}$

Beispiel: Benzol

$a = 15,048 \text{ J m}^{-2} \text{s}^{-1} \text{K}^{-1}$

$t_{Fkolor} = 2397 \text{ }^{\circ}\text{C}$

$\theta_{Sied} = 80 \text{ }^{\circ}\text{C}$

$M = 78,1 \text{ J mol}^{-1}$

$H_{Verd} = 3,077 \cdot 10^4 \text{ g mol}^{-1}$

$$\bar{c}_p = 1,3269 \cdot 10^2 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$$

$$\vartheta_A = 0 \text{ °C}$$

Ergebnis: $6,579 \cdot 10^{-2} \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$

$$\dot{m}'' = \frac{1,25 \cdot 10^{-6} \rho \cdot H_U}{H_{Verd} + \bar{c}_p (t_{Sied} - t_A)} \quad (38)$$

Es bedeuten:

\dot{m}'' - Massenabbrandgeschwindigkeit in $\text{kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$

ρ - Dichte der Flüssigkeit in kg m^{-3}

H_U - unterer Heizwert in J mol^{-1}

\bar{c}_p - mittlere molare spezifische Wärme der Flüssigkeit im Intervall t_A bis t_{Siede} in $\text{J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$

H_{Verd} - Verdampfungswärme in J mol^{-1}

θ_A - Anfangstemperatur in °C

θ_{Sied} - Siedetemperatur in °C

Für Benzol errechnet sich ein Wert von $6,6 \cdot 10^{-2} \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$

Auf der Grundlage einer Reihe von Vergleichsrechnungen wurde für Brände mit einem Durchmesser $>10 \text{ m}$ die nachfolgende vereinfachte Formel entwickelt.

$$\dot{m}'' = a \cdot \frac{H_U}{H_{Verd}} \cdot \rho \quad (39)$$

Für Flüssigkeiten mit einem Flammpunkt $> 21 \text{ °C}$ wird für a ein Faktor von $7,5 \cdot 10^{-7}$ und für Flüssigkeiten mit einem Flammpunkt von $< 21 \text{ °C}$ ein Faktor von $1,27 \cdot 10^{-6}$ angenommen. Unter diesen Annahmen ergibt sich für Benzol ein Betrag von $11,2 \cdot 10^{-2} \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$.

Tab. 17: Berechnete und experimentell bestimmte Werte für \dot{m}^* in $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$

Stoff	Berechnung nach (37)	Berechnung nach (38)	Berechnung nach (39)	experimentell bestimmt
Benzen	$6,6 \cdot 10^{-2}$	$6,6 \cdot 10^{-2}$	$11,2 \cdot 10^{-2}$	$8,08 \cdot 10^{-2}$
Propanon	$5,8 \cdot 10^{-2}$	$4,2 \cdot 10^{-2}$	$5,69 \cdot 10^{-2}$	$4,33 \cdot 10^{-2}$
Ethanol	$3,1 \cdot 10^{-2}$	$2,9 \cdot 10^{-2}$	$4,02 \cdot 10^{-2}$	$2,60 \cdot 10^{-2}$

Es gilt aber zu bemerken, dass die angeführten Berechnungsvorschläge nur zu angenäherten Werten führen. Insofern liegt ein beträchtlicher Fehler vor, wenn man voraussetzt, dass die experimentell gewonnenen Ergebnisse aus sorgfältig durchgeführten Versuchen resultieren.

1.5.5 Wärmestrom des Brandes

Der Wärmestrom Φ eines Brandes entspricht der pro Zeiteinheit freigesetzten Wärmemenge. Seine Berechnung ist mit nachfolgender Formel möglich:

$$\Phi = q_0 \cdot \pi \cdot (V_{aus} \cdot t_{Brd})^2 = q_0 \cdot A_{Brd} \quad (40)$$

Es bedeuten:

q_0 = Wärmestromdichte in MW m^{-2}

V_{aus} = Brandausbreitungsgeschwindigkeit in m min^{-1}

t_{Brd} = Zeit der Brandentwicklung in min

A_{Brd} = Brandfläche in m^2

Das Zeitintervall der Ausbreitung des Brandes über die gesamte Brandstoffoberfläche wird unter Bezug auf Beobachtungen bei Realbränden bzw. auf Ergebnisse bei Brandversuchen im Freien in Abhängigkeit von der dabei festgestellten Brandausbreitungsgeschwindigkeit in Größenordnungen zwischen 2 und 10 Minuten angegeben (siehe Tabelle 42 im Anhang). Hat sich der Brand über die gesamte Brandstoffoberfläche ausgebreitet, erreicht der Wärmestrom des Brandes seinen Maximalwert. Der Wärmestrom eines Brandes bestimmt somit dessen Wärmewirkung auf die Umgebung, d.h. auf Gebäude, benachbarte Anlagen usw. Der Begriff Wärmestrom wird im Zusammenhang mit der Behandlung von Bränden in Räumen in Form des Terminus Energiefreisetzungsrates erneut benutzt.

1.5.6 Wärmestromdichte des Brandes

Eine größere Bedeutung hinsichtlich einer Abschätzung der von einem Brand ausgehenden thermischen Wirkungen besitzt die Wärmestromdichte q_0 eines Brandes. Unter Wärmestromdichte wird die Wärmemenge verstanden, die bei einem Brand unter günstigsten Bedingungen pro Fläche und Zeiteinheit freiwerden kann – siehe Tabelle 52 im Anhang. Sie errechnet sich nach der Formel:

$$q_0 = \frac{m_{Bst} \cdot H_U}{A_{Brd} \cdot t_{Brd}} \quad (41)$$

Es bedeuten:

m_{Bst} - Brandstoffmasse in kg

H_U - Heizwert in MJ kg⁻¹

A_{Brd} - Brandfläche in m²,

t_{Brd} - Branddauer in min

Nach Einführung der relativen Abbrandgeschwindigkeit (siehe Gleichung 34) in Gleichung (41) ergibt sich:

$$\dot{q}_0'' = H_U \cdot \dot{m}_{rel}'' \quad (42)$$

Es bedeuten:

\dot{q}_0'' - Wärmestromdichte in MW m⁻²

H_U - unterer Heizwert in MJ kg⁻¹

\dot{m}_{rel}'' - relative Abbrandgeschwindigkeit in kg m⁻² s⁻¹

Die nachfolgende Tabelle enthält eine Auswahl an Wärmestromdichten, wie sie bei Bränden unter Beteiligung von in der Praxis üblicher Stoffe zu erwarten sind.

Tab. 18: Wärmestromdichten einiger üblicher Brandstoffe

Brandstoff	H_u in MJ kg ⁻¹	\dot{m}_{rel}'' in kg m ⁻² s ⁻¹	\dot{q}_0'' in MW m ⁻²
Holzfasern	19	1,39·10 ⁻²	0,26
Naturkautschuk	42	1,11·10 ⁻²	0,46
Synthesekautschuk	42	0,83·10 ⁻²	0,55
Polystyren	42	0,84·10 ⁻²	0,35
PMMA	15	0,84·10 ⁻²	0,12
Ethanol	33,8	2,9·10 ⁻²	0,82
Propanon	28,4	4,2·10 ⁻²	1,2
Benzen	39,5	6,6·10 ⁻²	2,5

Im Falle des Vorkommens mehrerer in ihren Stoffparametern voneinander abweichender Brandstoffe in einem Bereich kann für die Berechnung eines durchschnittlichen Betrages für die Wärmestromdichte \dot{q}_0'' nachfolgende Gleichung verwendet werden:

$$\bar{\dot{q}}_0'' = \frac{\sum(H_{ui} \cdot m_{Bst,i})}{A_{BrdF}} \quad (43)$$

$H_{u,i}$ - Heizwert des jeweiligen einzelnen Brandstoffs in kJ kg⁻¹

$m_{Bst,i}$ - Masse des jeweiligen einzelnen Brandstoffs in kg

A_{BrdF} - Gesamtfläche der Brandstoffe in m²

1.5.7 Brandausbreitungsgeschwindigkeit

Der Begriff Brandausbreitungsgeschwindigkeit (v_{aus}) wird nahezu ausschließlich für die Brandausbreitung auf den Oberflächen fester und flüssiger Stoffe verwandt. So gesehen, ist darunter die Bewegung der Flammenfront in der Brandausbreitungsrichtung je Zeiteinheit zu verstehen. Im Zusammenhang mit der Ausbreitung der Flammenfront in Gas-, Dampf- und Staub-Luft-Gemischen wird der Begriff Flammenfortpflanzungsgeschwindigkeit (V_{FF}) benutzt. Diese Kennzahl ist auf die Fortbewegung von Flammen innerhalb von Gas-, Dampf- oder Staub-Luft-Gemischen mit gleichmäßiger Brennstoffverteilung bezogen. Sie gibt den Weg an, der nach der Zündung von der Flammenfront pro Zeit in Richtung des unverbrannten Gemisches zurückgelegt wird. Die Geschwindigkeitswerte hängen stark von den experimentellen Bedingungen ab, unter denen sie ermittelt wurden (Strömungszustand sowie Druck und Temperatur, Brennstoff-, Inertgas- und Sauerstoffgehalt im Gemisch, Partikelfeinheit bei Stäuben, Ausbreitungsrichtung der Flamme u. a.). Mit Ausnahme von Acetylen liegen die Werte für Flammenfortpflanzungsgeschwindigkeit

schwindigkeit in Kohlenwasserstoff-Luft-Gemischen im Bereich von etwa 0,4 bis 0,8 m s⁻¹. Bei Brennstoff-Sauerstoff-Gemischen weisen Wasserstoff und Ethin mit 11 bis 12 m s⁻¹ die höchsten Werte auf.

Für Gasedetonationen, die z. B. in Rohrleitungen bestimmter Länge und Weite ablaufen können, sind Flammenfortpflanzungsgeschwindigkeiten in Verbindung mit Luft von über 1.000 m s⁻¹ und bei Gas-Sauerstoff-Gemischen bis etwa 4.000 m s⁻¹ möglich. Diese enormen Geschwindigkeiten werden wegen der starken turbulenten Vermischung und der Gaskomprimierung durch Stoßwellen erreicht. Die Flammenfortpflanzungsgeschwindigkeit erreicht bei vorgemischten brennbaren Systemen (Gemische) die größten Beträge, weil bei diesen brennbaren Systemen die Ausbreitungsgeschwindigkeit nur von der chemischen Reaktion und nicht von der Gemischbildung oder von der Verdampfung bzw. Pyrolyse bestimmt werden. Sie liegt in der Größenordnung von 600 bis 12.000 m s⁻¹.

Tab. 19: Flammenfortpflanzungsgeschwindigkeit in Rohren

Stoffgemisch	V_{FF} in m s ⁻¹
Methan/Luft	1.440
Methan/Sauerstoff	1.620
Ethen/Luft	2.520
Ethen/Sauerstoff	14.940
Wasserstoff/Luft	10.260
Wasserstoff/Sauerstoff	39.600
Ethin/Luft	6.120

In Größenordnungen niedriger liegen die Beträge für die Ausbreitungsgeschwindigkeit bei festen und flüssigen Brandstoffen. Darüber hinaus vollzieht sich die Bewegung der Flammenfront auf Feststoffen und Flüssigkeiten eher ungleichförmig, d. h. sie ist nicht für jeden Abschnitt der Brandstoffoberfläche gleich.

v_{aus} ergibt sich somit als Differential des Weges nach der Zeit:

$$v_{aus} = \frac{dl}{dt} \quad (44)$$

Es bedeuten

v_{aus} - Brandausbreitungsgeschwindigkeit m min⁻¹

l - Weglänge in m

t_{Brd} - Branddauer in min

In der Praxis wird deshalb eine mittlere lineare Brandausbreitungsgeschwindigkeit verwendet:

$$\bar{v}_{aus} = \frac{l}{t} \quad (45)$$

Sie stellt eine Näherungsgröße dar, die praktische Berechnungen mit ausreichender Genauigkeit gestattet. Die Brandausbreitungsgeschwindigkeit ist außer von solchen Stoffeigenschaften wie Aggregatzustand, Temperatur u. a. abhängig:

- vom Verteilungsgrad des Brandstoffs
- von der räumlichen Anordnung des Brandstoffs
- von der Wärmeübertragung aus der Flamme oder anderen Wärmequellen auf den Brandstoff und
- von den Bedingungen der Luftzufuhr bzw. Strömungsgeschwindigkeit der Zuluft

Die Brandausbreitungsgeschwindigkeit ist insbesondere bei Flüssigkeiten stark von deren Temperatur abhängig.

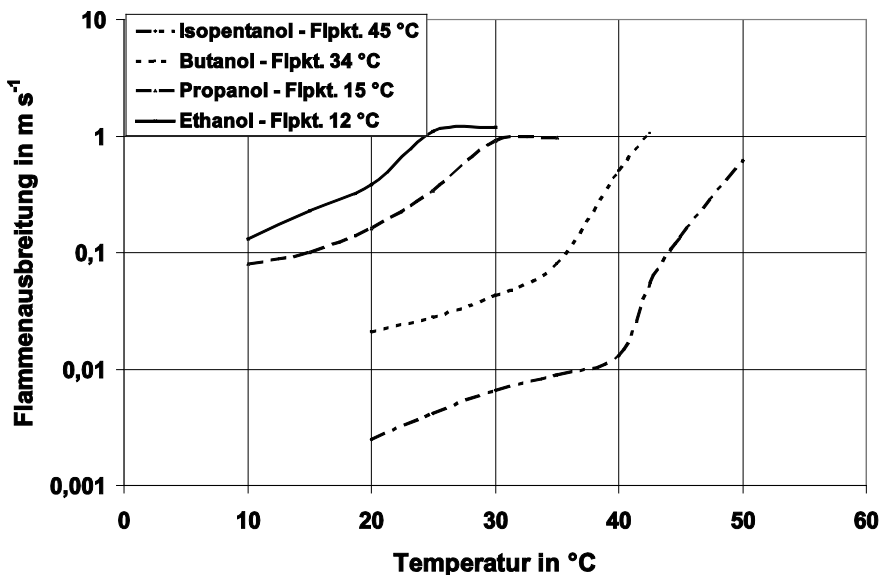


Abb. 33: Abhängigkeit der Brandausbreitungsgeschwindigkeit auf Flüssigkeitsoberflächen von der Temperatur der Flüssigkeit

Wie ersichtlich, steigt die Brandausbreitungsgeschwindigkeit oberhalb des Flammpunkts sehr steil an. Bei Raumtemperatur (20 °C) liegt sie für flüssige Brandstoffe im Bereich von 0,015 m s⁻¹ bis 0,9 m s⁻¹. Bei Flüssigkeiten vergleichbarer Brennbarkeit (Beurteilung der Brennbarkeit erfolgte mittels Sauerstoffindex) ist die Brandausbreitungsgeschwindigkeit bei einer Flüssigkeitstemperatur von 20 °C umso größer, je niedriger der Flammpunkt liegt.

Die niedrigste Brandausbreitungsgeschwindigkeit wird bei Feststoffen gemessen. Feststoffe bedürfen, um selbständig brennen zu können, einer thermischen Aufbereitung in Form des Schmelzen und/oder der Pyrolyse. Wie schon ausgeführt, ist hierfür eine entsprechende Wärmezufuhr erforderlich, die deutlich über der für die Verdampfung von Flüssigkeiten notwendigen Wärmezufuhr liegt.

Da Feststoffe nicht grundsätzlich in horizontaler Anordnung anzutreffen sind, wird entsprechend den häufigsten Anordnungsformen in eine vertikale und die horizontale Brandausbreitung unterschieden. Die größte Brandausbreitungsgeschwindigkeit wird bei der vertikalen Brandausbreitung von unten nach oben und die niedrigste bei der Ausbreitung von oben nach unten beobachtet.

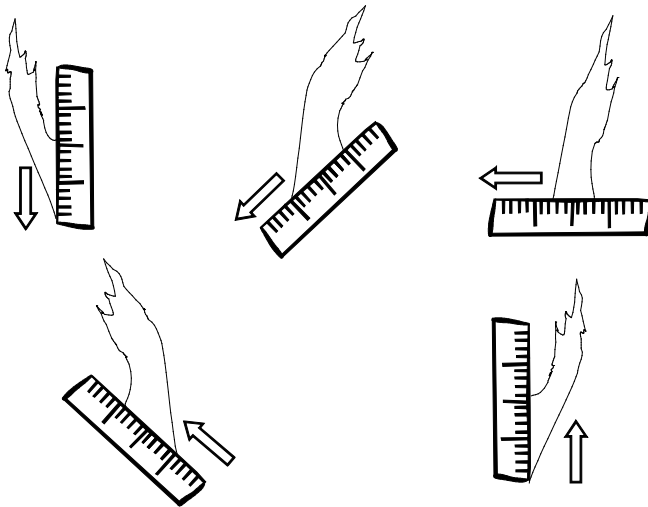


Abb. 34: Raumgeometrische Situationen der Brandausbreitung bei Feststoffen

Für Berechnungen und zum Vergleich einzelner Stoffe im Rahmen des vorbeugenden Brandschutzes wird eine Brandausbreitungsgeschwindigkeit v_{aus} verwendet, die bei horizontaler Brandausbreitung ermittelt wurde. Diese Untersuchungen werden bei optimalen Strömungsgeschwindigkeiten für die Luftzuführung unter Vollbrandbedingungen bestimmt. Derartige Untersuchungen werden in speziellen Versuchsanordnungen durchgeführt, z. B. der 25-Fuß-Tunneltest bzw. der 2-Fuß-Tunneltest nach ASTM E 84. Hinsichtlich der Minimierung des Kostenaufwandes wurden kleinere Versuchsanordnungen entwickelt. Diese gestatten, Ergebnisse mit einem tolerierbaren Fehler in einem bestimmten Untersuchungsbereich zu ermitteln, die eine Umrechnung für full scale-Verhältnisse ermöglichen.

Die Brandausbreitungsgeschwindigkeit v_{aus} fester Stoffe beträgt z. B. in Schnittholzstapeln $0,066 \text{ m s}^{-1}$, in Holzkonstruktionen mit Hohlräumen $0,033 \text{ m s}^{-1}$ und auf Holzdächern $0,0166 \text{ m s}^{-1}$. Bei Textilien (Mischfasern bzw. Synthefasern) in Warenträgern hängend wurden Werte von $3,5$ bis $5,2 \text{ m min}^{-1}$ im Großversuch bestimmt.

In der Praxis ist die Brandausbreitung immer im Zusammenhang mit einer konkreten Brandfläche zu sehen. Somit hängt die Richtung der Brandausbreitung von der Flächengeometrie (siehe Abbildung 35) und der Brandausbreitungsgeschwindigkeit ab.

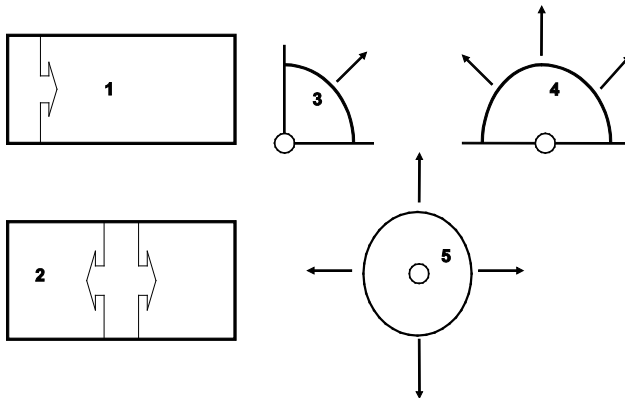


Abb. 35: Idealisierte Formen der flächenbezogenen Brandausbreitung 1 und 2 -rechteckförmig mit ein- bzw. zweiseitiger Ausbreitung nach Linienzündung, 3 bis 5 – viertel-, halb- und vollkreisförmige Ausbreitung nach Mittelpunktzündung [1.9]

Kreisförmige Ausbreitung bei Mittelpunktzündung:

$$A_{Brd} = \pi \cdot v_{aus}^2 \cdot t_{Brd}^2 \quad (46)$$

Teilkreisförmige Ausbreitung:

$$A_{Brd} = \frac{\pi \cdot v_{aus}^2 \cdot t_{Brd}^2 \cdot \varphi}{360} \quad (47), \text{ wobei}$$

A_{Brd} - Brandfläche in m^2

v_{aus} - Brandausbreitungsgeschwindigkeit in m min^{-1}

t_{Brd} - Branddauer in min

φ - Öffnungswinkel des angenommenen Teil- oder Vollkreises

Linienzündung bei einseitiger Ausbreitung über die gesamte Breite einer rechteckigen Fläche:

$$A_{Brd} = n \cdot v_{aus} \cdot t_{Brd} \cdot b \quad (48), \text{ wobei}$$

A_{Brd} - Brandfläche in m^2

v_{aus} - Brandausbreitungsgeschwindigkeit in $m \text{ min}^{-1}$

t_{Brd} - Branddauer in min

n - Anzahl der sich einstellenden Ausbreitungsfronten

Linienzündung bei zweiseitiger Ausbreitung über die gesamte Breite einer rechteckigen Fläche

$$A_{Brd} = 2 \cdot v_{aus} \cdot t_{Brd} \cdot b \quad (49)$$

b - Raumbreite in m

Wird die Flächenzunahme (46 bis 49) auf die Branddauer t_{Brd} bezogen, erhält man die zeitliche Flächenzunahme. So ergibt sich z. B. bei vollkreisförmiger Ausbreitung (siehe Gleichung 46) mit $v_{aus,lin} = 0,2 \text{ m s}^{-1}$ und $t_{Brd} = 180 \text{ Sekunden}$ eine Brandfläche $A_{Brd} = 4069,5 \text{ m}^2$. Deren mittlerer Zuwachs beträgt $22,61 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$.

1.5.8 Brandrauch

1.5.8.1 Berechnungen der Verbrennungsluft- und der Gesamtrauchgasvolumina

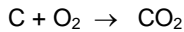
Die nachstehenden Reaktionsgleichungen [1.13] gelten für die Grundbestandteile von festen und flüssigen Brennstoffen. Auf eine Behandlung der Verbrennung gasförmiger Brennstoffe wird aus Platzgründen innerhalb dieses Buches verzichtet und auf einschlägige Literatur zu technischen Verbrennungsvorgängen verwiesen. Im Hinblick auf die Aufstellung der Verbrennungsgleichungen und den damit verbundenen Phasenübergang flüssig/gasförmig bzw. fest/gasförmig wurden die aktuellen Werte für das Molvolumen und das Molekulargewicht eingesetzt. Da bei festen Brennstoffen molare Massen verwendet werden, sind diese Kenngrößen in der folgenden Tabelle zusammengefasst:

Tab. 20: Molare Stoffkennwerte M und V_m

	C	H₂	N₂	O₂	S	H₂O	SO₂	CO₂
molare Masse M in kg kmol^{-1}	12,01	2,016	28,01	32,00	32,00	18,02	64,07	28,01
molares Volumen V_m $\text{m}^3 \text{ kmol}^{-1}$	-	22,43	22,41	22,39	-	22,4	21,89	22,26

Ein Normkubikmeter oder Normalkubikmeter V_n ist die Menge, die bei einem Druck p_n von 1,01325 bar, einer Luftfeuchtigkeit von 0 % (trockenes Gas) und einer Temperatur von $T_n = 273,15 \text{ K}$ ($t_n = 0 \text{ °C}$) (Normbedingungen nach DIN 1343) bzw. bei 15 °C (Bedingung nach ISO 2533) ein Volumen V von einem Kubikmeter hätte. Die molaren Stoffkennwerte werden aus der Tabelle 20 entnommen

Kohlenstoff – C:



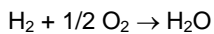
$$1 \text{ kmol C} + 1 \text{ kmol O}_2 = 1 \text{ kmol CO}_2$$

$$12,011 \text{ kg kmol}^{-1} + 22,392 \text{ Nm}^3 \text{ kmol}^{-1} = 22,261 \text{ Nm}^3 \text{ kmol}^{-1}$$

$$22,392 \text{ Nm}^3 \text{ kmol}^{-1} : 12,01 \text{ kg kmol}^{-1} \approx 1,86 \text{ Nm}^3 \text{ O}_2/\text{kg C} \text{ (2,67kg O}_2/\text{kg C)}$$

$$22,261 \text{ Nm}^3 \text{ kmol}^{-1} : 12,01 \text{ kg kmol}^{-1} \approx 1,85 \text{ Nm}^3 \text{ CO}_2/\text{kg C}$$

Wasserstoff – H₂:



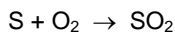
$$1 \text{ kmol H}_2 + 1/2 \text{ kmol O}_2 = 1 \text{ kmol H}_2\text{O}$$

$$2,016 \text{ kg kmol}^{-1} + 0,5 \cdot 22,392 \text{ Nm}^3 \text{ kmol}^{-1} = 22,4 \text{ Nm}^3 \text{ kmol}^{-1}$$

$$22,392 \text{ Nm}^3 \text{ kmol}^{-1} : 2,016 \cdot 2 \text{ kg kmol}^{-1} \approx 5,55 \text{ Nm}^3 \text{ O}_2 \cdot \text{kg}^{-1} \text{ H} \text{ (8 kg O}_2/\text{kg H}_2)$$

$$22,4 \text{ Nm}^3 \text{ kmol}^{-1} : 2,016 \text{ kg kmol}^{-1} \approx 11,2 \text{ Nm}^3 \text{ H}_2\text{O} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ H}$$

Schwefel – S:



$$1 \text{ kmol S} + 1 \text{ kmol O}_2 = 1 \text{ kmol SO}_2$$

$$32,06 \text{ kg kmol}^{-1} + 22,39 \text{ Nm}^3 \text{ kmol}^{-1} = 21,89 \text{ Nm}^3 \text{ kmol}^{-1}$$

$$22,39 \text{ Nm}^3 \text{ kmol}^{-1} : 32,06 \text{ kg kmol}^{-1} \approx 0,70 \text{ Nm}^3 \text{ O}_2 \cdot \text{kg}^{-1} \text{ S} \text{ (1 kg O}_2/\text{kg S)}$$

$$21,89 \text{ Nm}^3 \text{ kmol}^{-1} : 32,06 \text{ kg kmol}^{-1} \approx 0,7 \text{ Nm}^3 \text{ SO}_2 \cdot \text{kg}^{-1} \text{ S}$$

Umrechnungen für Stickstoff – N₂

$$\text{kg kmol}^{-1} \rightarrow \text{Nm}^3 \text{ kmol}^{-1}$$

$$22,40 \text{ Nm}^3 \text{ kmol}^{-1} : 28,01 \text{ kg kmol}^{-1} \approx 0,80 \text{ Nm}^3 \text{ kg}^{-1}$$

Sauerstoff – O₂

kg kmol⁻¹ → Nm³ kmol⁻¹

22,39 Nm³ kmol⁻¹: 32 kg kmol⁻¹ ≈ 0,70 Nm³ kg⁻¹

Wasser – H₂O

Kg kmol⁻¹ → Nm³ kmol⁻¹

21,1 Nm³ kmol⁻¹: 18,02 kg kmol⁻¹ ≈ 1,17 Nm³ kg⁻¹

Die Berechnung des theoretischen Luftbedarfes

Bei technischen Verbrennungsprozessen wird für die Verbrennung notwendige Sauerstoff meist aus der Umgebungsluft zugeführt. Bei Schadenfeuern realisiert sich die Sauerstoffzuführung selbständig aus der Atmosphäre (Umgebung). Gehalte an Edelgasen und an Kohlendioxid in der Luft werden vernachlässigt. Grundsätzlich gilt für den für die Verbrennung notwendigen Sauerstoffbedarf:

$$O_{2,\min} = 1,867C + 5,6H + 0,7S - 0,7O \quad (50)$$

In 1 Nm³ Luft sind 0,21 Nm³ und 0,79 Nm³ Stickstoff enthalten.

Die Luftmenge, die theoretisch zur vollständigen Verbrennung erforderlich ist, beträgt daher:

$$L_{\min} = \frac{O_{2,\min}}{0,21} \text{ in Nm}^3 \text{ kg}^{-1} \quad (51)$$

Der Einfluss der Feuchtigkeit der Luft wird hinsichtlich deren Bedeutung bei Schadenfeuern vernachlässigt.

Berücksichtigung des Luftüberschusskoeffizienten

In der Regel reicht der theoretische Luftbedarf für eine vollständige Verbrennung nicht aus. Der tatsächliche Luftbedarf ist also höher als der theoretische. Der Faktor, mit dem der theoretische Luftbedarf multipliziert werden muss, um auf den tatsächlichen Luftbedarf zu kommen, wird mit α bezeichnet.

$$\alpha_{Luft} = V_{TLuft}/V_{Luft} \quad \text{auch als } \lambda = L_t/L_{t,\min}$$

Verbrennung im Luftüberschuss

Bei der Verbrennung mit Luftüberschuss wird selbstverständlich die Abgasmenge um den Betrag der überschüssigen Verbrennungsluft größer. Diese überschüssige Verbrennungsluft errechnet sich wie folgt:

$$\Delta V_{Luft} = (\alpha_{Luft} - 1) V_{Luft}^{\circ} \quad (52)$$

Daraus ergibt sich für die tatsächliche Verbrennungsgasmenge bei der Verbrennung mit Luftüberschuss:

$$V_{Luft} = L_{min} + (\alpha_{Luft} - 1) V^{\circ}_{Luft} \text{ in Nm}^3 \text{ kg}^{-1} \quad (53)$$

Betrachtungen zur Rauchgasdichte

Vereinfacht betrachtet erscheint es zweckmäßig, das Abgas wie heiße Luft zu betrachten, zumal Schwankungen um den Zustand entsprechend der stofflichen Zusammensetzung kaum zu erwarten sind. Nach VDI-Wärmeatlas ergeben sich folgende Gasdichten bei 1 bar:

Für heiße Luft

Temperatur in °C	500	600	700	800	900
Gasdichte in kg m ⁻³	0,4502	0,3986	0,3567	0,3243	0,2967

Für reines CO₂

Temperatur in °C	500	600	700	800	900
Gasdichte in kg m ⁻³	0,4502	0,3986	0,3567	0,3243	0,2967

1.5.8.2 Brandgase/Freisetzungserzeugnisse – Entstehung und Zusammensetzung

Schadenfeuer verlaufen im Gegensatz zu Prozessen der technischen Verbrennung unvollkommen hinsichtlich der zu erwartenden Endprodukte sowie unvollständig bezogen auf den eingesetzten Brandstoff. Im Sinne von Rückständen und Freisetzungserzeugnissen sind zu erwarten:

- Brandstoffreste
- nichtbrennbare Rückstände in Form von Aschen und Schlacken
- unverbrannte Kohlenstoffanteile in Form von Ruß und
- Rauchgas
- bedingt durch Löschmaßnahmen noch zusätzlich kontaminierte Löschmittelreste

Wenngleich im Rahmen der folgenden Betrachtungen ausschließlich auf die von den Rauchgasen ausgehenden Wirkungen eingegangen wird, sollen hinsichtlich einer auf Brandursachen bezogenen Auswertung folgende Sachverhalte ergänzend genannt werden:

- Vereinfacht betrachtet sind sowohl das Entstehen bzw. Auftreten von Brandrückständen als auch ihre zu erwartenden Mengen als eine Funktion des ursprünglichen Aggregatzustandes zu verstehen.

- Entsprechend sind bei Bränden fester Stoffe fast immer Rückstände zu erwarten, bei Flüssigkeiten seltener, bei Gasen fast nie.
- Die Wahrscheinlichkeit des Auffindens von Brandstoffsrückständen erhöht sich durch den Einsatz von Löschmitteln und das Ablöschen der Stoffe vor deren vollständiger Verbrennung.

Das heißt, dass sich das Spektrum der Rückstandsstoffe zwischen Ausgangsstoff über Restkohlenstoff bis hin zu den nichtbrennbaren Inhaltsstoffen bewegt.

Weiterhin gilt es zu beachten, dass sich auf der Oberfläche bzw. in diesen Brandrückständen u. a. unverbrannte Spaltprodukte, Freisetzungserzeugnisse benachbart lagernder Brandstoffe, Brandbeschleunigungsmittel und Rückstände von Löschmitteln niederschlagen können. Dies macht diese Rückstände sowohl hinsichtlich einer weiteren analytischen Untersuchung als auch in ihrer Handhabung so problematisch.

Insbesondere betrifft das teilumgesetzte Produktanteile wie Ruß (Kohlenstoff), Pyrolyse-gase, Monomere bei Kunststoffen und andere, die sich bei unvollkommener Verbrennung bilden können. Ihre spätere Wiederfindung hängt vor allem von ihrer Flüchtigkeit (Verdampfen über entsprechende lange Zeiträume) bzw. von ihrer Fixierung auf festen Oberflächen (Adsorption) wie z. B. dem Ruß ab. Doch auch an den inneren Oberflächen von Flugaschen können sich Stoffe niederschlagen.

Nach [1.14] ist von den in der nachfolgenden Tabelle aufgeführten Inhaltsstoffen auch bei üblichen Bränden auszugehen. Hierbei ist aber noch zu berücksichtigen, dass sich bei einschränkend wirkenden Verbrennungsbedingungen wie einer unzureichenden Sauerstoffversorgung die Zusammensetzung der Brandgase eindeutig in Richtung der Produkte einer unvollkommenen Verbrennung verschiebt. Dies bedeutet, dass die freiwerdenden Brandgase grundsätzlich im hohen Maße gefährliche Inhaltsstoffe enthalten.

Tab. 21: Übersicht über wesentliche im Brandfall zu erwartende Schadstoffe

brennbarer Stoff	Brandphasen				kalte Brandstelle
	Brandentwicklung	Vollbrand	Brandbekämpfung	Nachlöschen und Abkühlungsphase	
Polymer vom Typ PE bzw. PP	CO ₂ , CO, H ₂ O KW	CO ₂ , CO, H ₂ O, Aromaten, PAK, gesättigte und ungesättigte KW, Alkohole, Aldehyde Carbonsäurederivate	CO ₂ , CO, H ₂ O, Aromaten, PAK, gesättigte und ungesättigte KW, Alkohole, Aldehyde Carbonsäurederivate	Aromaten, PAK Aldehyde	Aromaten, PAK Aldehyde
Polymer vom Typ PS	CO ₂ , CO, H ₂ O Aromaten, PAK	CO ₂ , CO, H ₂ O Aromaten, PAK, Alkene, Aldehyde,	CO ₂ , CO, H ₂ O Aromaten, PAK, Alkene, Aldehyde,	Aromaten, PAK, Alkene, Aldehyde,	Aromaten, PAK
Chlorhaltige Kunststoffe wie PVC	CO ₂ , CO, H ₂ O, HCl, CKW	CO ₂ , CO, H ₂ O, HCl, COCl ₂ , Aromaten, Chloraromaten, PCDD/PCD, gesättigte und ungesättigte KW, z.T. CKW	CO ₂ , CO, H ₂ O, HCl, Aromaten, Chloraromaten, PCDD/PCDF Gesättigte und ungesättigte KW, z.T. CKW	HCl, Aromaten, Chloraromaten PCDD/PCDF gesättigte und ungesättigte KW, z.T. CKW Vinylchlorid	Chloraromaten, Aromaten, PCDD/PCDF
Cellulose (Holz, Papier, Zellstoff)	CO ₂ , CO, H ₂ O	CO ₂ , CO, H ₂ O, Aldehyde, Aromaten, PAK, Alkohole Essigsäure, KW	CO ₂ , CO, H ₂ O, Aldehyde, Aromaten, PAK, Alkohole Essigsäure, KW	Aldehyde, Aromaten, PAK, Alkohole Essigsäure, KW	(Aromaten), PAK,
CO ₂ - Kohlendioxid			KW - Kohlenwasserstoffe		
CO - Kohlenmonoxid			CKW - chlorierte Kohlenwasserstoffe		
H ₂ O - Wasser			PCDD - polyhalogenierte Dibenzopara-Dioxine		
Aromaten - aromatische Kohlenwasserstoffe wie Benzen, Toluol, Xylen			PCDF - polyhalogenierte Dibenzopara-Furane		
			PVC - Polyvinylchlorid		
			PAK - polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe (mehrkernige Aromaten)		

Bei den meisten Bränden wird die Brandgastoxizität vor allem vom CO bestimmt. Der Hauptgrund hierfür ist, dass die übrigen Rauchgaskomponenten zusammen meist nicht

einmal die Menge des entstehenden Kohlenmonoxids erreichen und diese größtenteils eine weit geringere Toxizität als CO besitzen. Bezogen auf die Gesamtpalette an brennbaren Stoffen ergibt sich in Abhängigkeit von den auftretenden Elementen folgende Übersicht zur Elementspezifik der Verbrennungsprodukte.

Tab. 22: Übersicht Elementspezifik der Verbrennungsprodukte

Element	Mineralisierungsprodukte	Produkte der unvollkommenen Verbrennung nach Menge/Häufigkeit/ Toxizität	
		dominant	untergeordnet
C, H, O	CO ₂ *, H ₂ O*	CO+	H ₂
N	N ₂ *	NO ₂ +	NO / NO _x +
		HCN+	NH ₃ + Nitrile+
			Amine Isocyanate Nitrosamine u. a.
S	SO ₃	SO ₂ +	H ₂ SO ₄
		H ₂ S+	H ₂ S+ Mercaptane u. a.
P	PO ₄ ³⁻ *, P ₂ O ₅		PH ₃ + u. a.
Cl, Br, J, F	HCl/HBr/HF/HJ *		Cl ₂ /Br ₂ /J ₂ COCl ₂ /COF ₂ +
			Chlororganika, wie: PHDD/F, PCB, Chlorbenzole, Chlorphenole u. v. a.

Legende: * üblicherweise Hauptprodukt, + toxikologisch bedeutsam

Folgende organischen Verbrennungsprodukte in Form von Einzelstoffen und Verbindungsklassen sind bei üblichen Schadenfeuern als Freisetzungserzeugnisse von Bedeutung:

Aldehyde – neben Acrolein auch Formaldehyd, Crotonaldehyd, weniger Acetaldehyd

Ketone – insbesondere ungesättigte C5-Ketone

Phenole, Chlorphenole, Chlorbenzole

Benzen, Alkylbenzene (Xylole, Toluol u. a.) Styrol u. ä.

Neben den Produkten einer vollkommenen Verbrennung, den anorganischen Oxiden, treten im Allgemeinen immer Reaktionsprodukte und Nebenprodukte der Pyrolyse und der unvollkommenen Verbrennung auf, die sowohl anorganischer als auch organischer Natur sein können. In vielen üblichen Rauchgasproben werden trotz unterschiedlicher Brandstoffzusammensetzung oftmals die gleichen Verbindungen nachgewiesen, da diese stabile Spalt- oder Oxidationsprodukte darstellen bzw. sich durch reaktive Prozesse über radikalische Zwischenprodukte bevorzugt (thermodynamisch begünstigt) in der Gasphase bilden. So sind bestimmte Aromaten (Toluol, Styren, Benzen, Xylen), PAK's (Naphthalen, Phenanthren) sowie aromatische/aliphatische Aldehyde/Ketone in den meisten Brandgasen zu finden.

Sind die an einem Brand beteiligten brennbaren Materialien bekannt, lässt sich in vielen Fällen grob abschätzen, ob von diesen Einzelstoffen bzw. Verbindungsklassen eine erhöhte Gefährdung ausgeht.

1.5.9 Gefahren durch Brandrauch

Die Gefährdung der Menschen bei einem Brand wird in bedeutendem Maße durch die Brandgase verursacht. Vom Brandrauch gehen nachfolgend aufgeführte Hauptgefährdungen aus:

- die Sichtbehinderung
- die Herabsetzung des Sauerstoffgehaltes in der Raumluft
- die Toxizität des Brandrauches
- die Wärmewirkung der heißen Rauchgase

Eine separate Betrachtung der Gefährdungen ist nur hinsichtlich bestimmter Untersuchungsmethoden angebracht. Ansonsten ist eine komplexe Betrachtung zwingend angezeigt. So stehen z. B. die toxische Wirkung der Brandgase und die von der optisch und geruchlich wahrnehmbaren Erscheinungsform Rauchgas ausgehenden (psychologischen) Wirkungen wie in Form einer Sichtbehinderung, einer Reizwirkung und einer Wärmewirkung zueinander in einer Wechselbeziehung. Die komplexe Wirkung der Brandgase auf den Menschen führt neben der direkten toxischen Wirkung somit zu psychischen Belastungen, die betroffene Menschen in eine äußerst labile Verfassung versetzen können. Dies kann z. B. zu einer rascheren Aufnahme von giftigen Stoffen infolge Hyperventilation führen. Die aufgenommenen toxischen Gase bzw. der Sauerstoffmangel führen andererseits zu einer Beeinträchtigung des Entscheidungs- und Orientierungsvermögens, somit zu Fehleinschätzungen in Bezug auf das körperliche Leistungsvermögen und auf zu überwindende Entfernungen usw. und schließlich zu Bewusstseinsstörungen. Die Folge kann z. B. Fluchtunfähigkeit sein.

Die bei der Betrachtung der Toxizität von Brandgasen praktizierte Herangehensweise einer Bewertung von Einzelkomponenten ist wenig zielführend, weil zum einen die Rauchgase in der Regel bezogen auf die Inhaltsstoffe komplex auftreten und in dieser Form die toxischen Effekte auf den menschlichen Organismus um ein Vielfaches schneller als bei einem Einzeltoxin wirken. So ist z. B. bekannt, dass eine geringe Konzentrationserhöhung an Kohlendioxid in der Atemluft die Atmung stimuliert, wodurch ein Anstieg bei der Aufnahme anderer giftiger Gase bei derartigen Konzentrationen eintreten kann. Bei der toxischen Wirkung von Rauchgasen sind daher zu beachten:

- die Konzentration der toxischen Komponenten
- deren mögliche Einwirkungsdauer
- das Atemminutenvolumen betroffener Personen
- die Temperatur der Rauchgase sowie
- die psychische und physische Verfassung der betroffenen Menschen

Erfahrungsgemäß werden deshalb mehr Brandtote festgestellt, die meist primär durch Sauerstoffmangel und die Toxizität der Brandgase zu Schaden gekommen sind, und erst sekundär durch Verbrennungen. Die Gefahren, die von den Brandgasen ausgehen, besitzen vor allem in Gebäuden eine große Bedeutung. In einem Raum sind in der Anfangsphase eines Brandes an unterschiedlichen Positionen auch unterschiedliche Verhältnisse hinsichtlich Temperatur, Rauchgaskonzentration, Sauerstoffkonzentration u. a. vorzufinden.

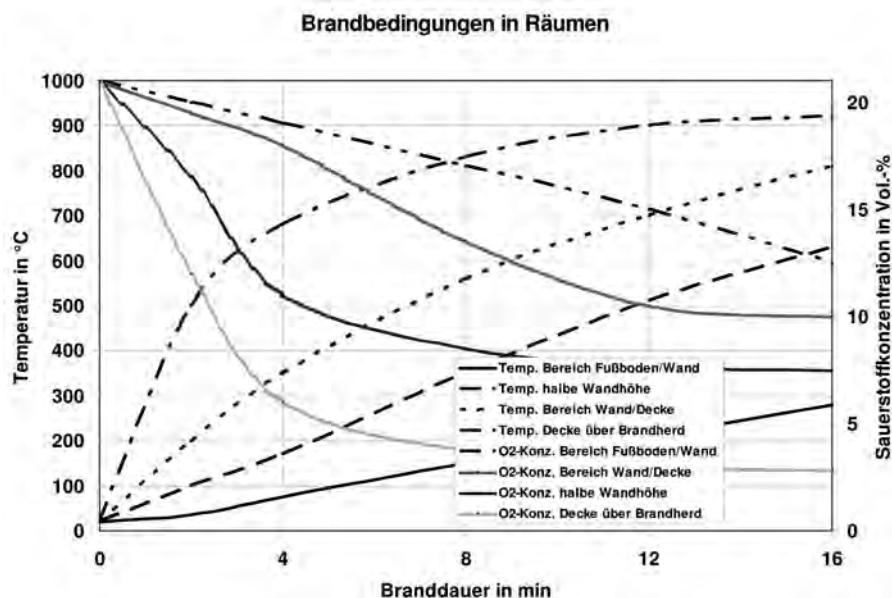


Abb. 36: Änderung der lokalen Sauerstoffkonzentrationen und Raumtemperaturen mit zunehmender Branddauer bei Bränden in Räumen, Preflashover-Phase - schematisch

Wie der Abbildung 36 zu entnehmen ist, verringert sich die Sauerstoffkonzentration direkt oberhalb des Brandherds (Decke) sehr schnell, während sie in Bodennähe in maximaler Entfernung vom Brandherd (Fußboden/Wand) nur langsam abfällt und nicht die Minimalwerte der vorgenannten Kurve erreicht. Die Positionen Wand/Decke und halbe Wandhöhe zeigen einen Sauerstoffkonzentrationsabfall, der zwischen dem der vorgenannten Kurven liegt. Die Temperatur der Raumluft steigt oberhalb des Brandherds am steilsten an. Der Anstieg der Kurven verringert sich zunehmend in der Reihenfolge Wand/Decke, halbe Wandhöhe und Fußboden/Wand.

Ein ähnlicher Kurvenverlauf wie für die Temperatur ist auch für die Parameter Sichtbehinderung und Konzentration der toxischen Gase zu erwarten. Im Zusammenhang mit der Untersuchung von Brandverläufen bei Bränden in Räumen wurde gefunden, dass kritische Konzentrationen in Kopfhöhe schon nach wenigen Minuten erreicht werden.

Eine Möglichkeit einer präventiven Beurteilung von Gefahrensituationen beim Brand besteht in einer vorherigen Bewertung möglicher Verbrennungs- und Pyrolyseprodukte von brennbaren Stoffen. Dies erfolgt unter Bezug auf geltendes Recht z. B. für in Verkehrsmitteln verbaute Werkstoffe (Eisenbahnpersonenwagen, Flugzeuge u. a.).

Bei einem Raumbrand ist in diesem Zusammenhang abweichend von der üblichen Beschreibung hinsichtlich seines Verlaufes von drei verschiedenen Situationen auszugehen:

1. Zündphase, die durch niedrige Raumtemperaturen und ein hohes Sauerstoffangebot gekennzeichnet ist
2. Flammenbrandphase, die durch hohe Temperaturen bei anfangs ausreichendem Sauerstoffangebot charakterisiert wird
3. Schwelbrandphase, die von niedrigen Temperaturen und Sauerstoffmangel begleitet wird

Wie Versuche in Wohnhäusern gezeigt haben, wird bei einem Flammenbrand eine Gefährdung für den Menschen durch den eintretenden Sauerstoffmangel (Gehalt $O_2 < 10$ Vol.-%) bestimmt. Zum Zeitpunkt, bei dem eine O_2 -Konzentration < 10 Vol.-% ermittelt wurde, bestanden infolge der Verqualmung auch keine ausreichenden Sichtverhältnisse mehr. Gleichzeitig lag die Kohlenmonoxidkonzentration noch nicht in einem Bereich, bei dem eine 1/2-stündige Exposition tödlich verläuft (Gehalt $CO > 0,28$ Vol.-%). Die Temperatur stieg hingegen auf gefährliche Werte (Raumtemperatur > 150 °C), bevor eine gefährliche CO -Konzentration erreicht wurde.

Bei einem Schwelbrand in einem vergleichbaren Objekt besteht die Gefährdung in einer zügigen Überschreitung der tödlichen Kohlenmonoxidkonzentration im Vergleich zu einer 1/2-stündigen Exposition in einem Raum mit einem Flammenbrand. Weiterhin ist mit einer deutlich früher eintretenden Sichtverschlechterung infolge des in Regel dichten Rauches zu rechnen.

Zwischen Rauchdichte und der CO-Konzentration besteht häufig ein proportionales Verhältnis. Der Temperaturanstieg dagegen erfolgt eher langsam. Eine besondere Gefährdung besteht auch im Vorhandensein von Stoffen, die eine Schleimhaut reizende Wirkung insbesondere der Atemwege ausüben. Hierzu zählen z. B. folgende Pyrolyseprodukte: Essigsäure, Acrolein, Acetaldehyd, Ameisensäure, NH_3 , Formaldehyd und Furfural. Diese Reizwirkungen können auf Grund einer verstärkten Aufnahme von toxischen Komponenten zu Atemstörungen führen. Insgesamt kann eingeschätzt werden, dass das Kohlenmonoxid die bestimmende toxische Komponente in Brandgasen ist. Geringe Mengen verschwelender Brandstoffe reichen aus, um in sehr kurzer Zeit tödlich wirkende Kohlenmonoxidkonzentrationen zu erzeugen. In Abhängigkeit vom Brandstoff liegt die Menge bei 25 bis 70 g pro m^3 des Raumes. So wird, wie aus den Abbildungen 37 und 38 ersichtlich ist, beim Verbrennen eines Brandstoffes wie Holz bei einem Wohnungsbrand u. a. das hochtoxische CO freigesetzt.

Sind bei diesen Bränden chlorhaltige Stoffe wie PVC beteiligt, können diese Stoffe mit verbrennen (PVC-weich) bzw. werden durch die hohen Brandtemperaturen vor allem zersetzt (PVC-hart), wobei Chlorwasserstoff (HCl) freigesetzt wird. Aus Abbildung 37 wird ersichtlich, dass bei einem Holzbrand in einem Raum mit oder ohne PVC-Beteiligung zum Zeitpunkt der Vollbrandphase im Maximum bis zu 2,0 Vol.-% CO im Rauchgas gemessen wurden. Unter der Voraussetzung, dass bei einem solchen Holzbrand die gleiche Masse an PVC beteiligt ist, erscheint die dreifach höhere Menge an HCl im Rauchgas durchaus plausibel, wobei nicht in Richtung PVC-weich oder PVC-hart unterschieden wurde. Wenn nun das CO als Produkt einer unvollkommenen Verbrennung des Holzes zu verstehen ist, stellt HCl ein Endprodukt der Verbrennung von PVC dar. Als Brandgase können neben den toxischen und hochkorrosiven HCl-Dämpfen u. a. Dioxine entstehen. Aus einem kg PVC-hart entwickeln sich etwa 550 g gasförmiges HCl. Bei PVC-weich ist insbesondere durch die mehr als 50 Mass.-% Weichmacher mit einem geringeren Chlorgehalt im Rauchgas zu rechnen.

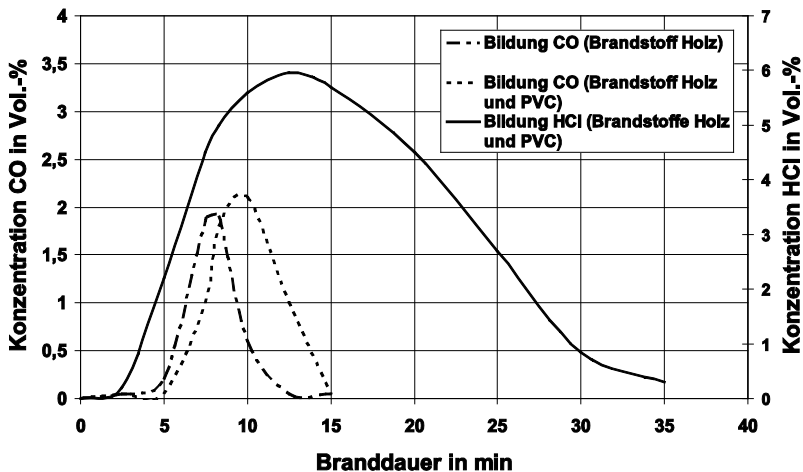


Abb. 37: Bildung toxischer Brandgase bei -Bränden von Holz in Verbindung mit PVC

Die nachfolgende Abbildung 38 zeigt den Verlauf von Temperaturentwicklung und Kohlenmonoxidbildung, wie sie bei einem Raumbrandversuch (Wohncontainerbrand) festgestellt wurde. Hierbei gilt es zu bemerken, dass die CO-Konzentration in etwa 1,50 m über dem Boden gemessen, während der Vollbrandphase ca. 2 Vol.-% erreichte, aber im Deckenbereich, gemessen im aus der Tür austretenden Rauchgasstrom, bis zu 10 Vol.-% erreichte.

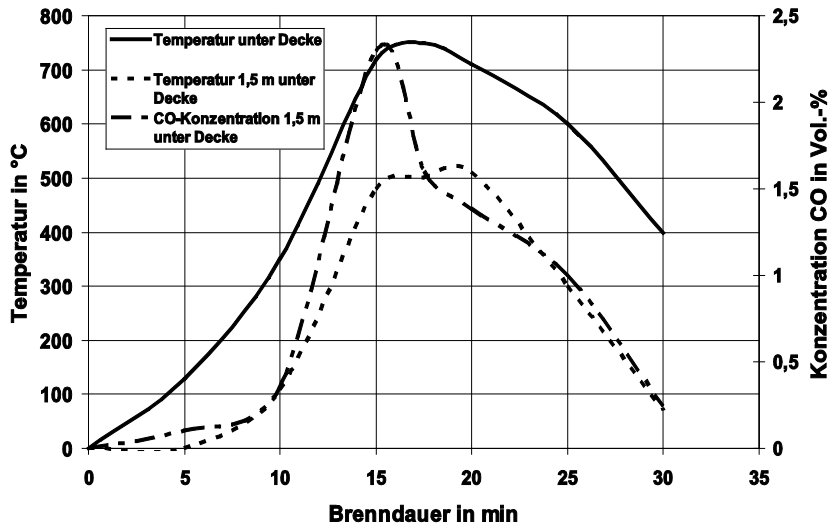


Abb. 38: Temperaturen und CO-Konzentrationen beim Raumbrand

In der nachfolgenden Abbildung wird auf die Verbrennung von PUR-Schaumstoff Bezug genommen, wie er häufig im Wohnbereich vorkommt. Beim Verbrennen dieses Stoffes wird u. a. HCN freigesetzt, wobei der Abbrand von 20 g bis 30 g PUR-Weichschaumstoff pro Kubikmeter des Raumes ausreicht, um eine schädigende HCN-Konzentration zu erzeugen. Weiterhin stellt die Flamschutz-ausrüstung von Kunststoffen ein weiteres Problem einer Gefährdung durch spezielle Freisetzungserzeugnisse dar, weil teilweise durch verzögertes Brennen verstärkt gefährliche Pyrolyseprodukte freigesetzt werden.

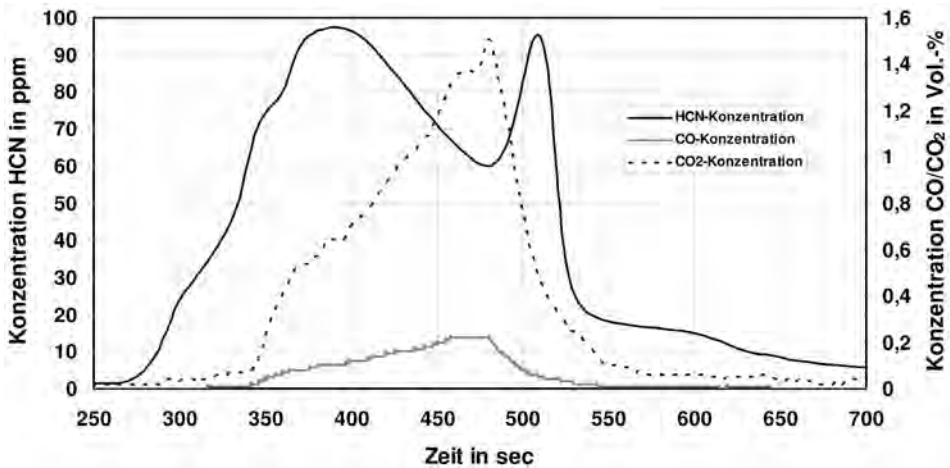


Abb. 39: Beispiel für die Bildung toxischer Brandgase bei PUR-Schaumstoff-Bränden

Darüber hinaus ist in diesem Zusammenhang auf die kanzerogene Wirkung bestimmter Komponenten im Rauchgas hinzuweisen, wobei dies insbesondere für das häufige Arbeiten an Brandstellen von Bedeutung ist (erforderliche Maßnahmen des Atem- und Körperschutzes beachten).

1.5.10 Kennzahlen zur Beurteilung der Wirkung von Brandrauch

1.5.10.1 Intensität der Brandrauchentwicklung

Die Intensität der Brandrauchentwicklung, ausgedrückt durch die Kennzahl I_{BR} , ist eine Maßgröße für das Brandrauchvolumen V_{BR} , das beim vollständigen Verbrennen eines Stoffs pro Zeit t_{Brd} und Brandfläche A_{Brd} freigesetzt wird:

$$I_{BR} = \frac{V_{BR}}{A_{Brd} \cdot t_{Brd}} \quad (54)$$

Diese Kennzahl mit der Dimension $m^3 \cdot m^{-2} \cdot min^{-1}$ kann auch aus dem spezifischen Luftbedarf $V_{L,spez}$ und der spezifischen Abbrandgeschwindigkeit $v_{ab,spez}$ berechnet werden:

$$I_{BR} = V_{L,spez} \cdot v_{ab,spez}. \quad (55)$$

Der Kennwert ist für die Berechnung des Gasaustausches bei Raumbränden und für die Auslegung von Rauch- und Wärmeabzugsanlagen von Interesse. Näherungsweise ist damit eine Berechnung der Volumina von Rauchgaswolken möglich.

1.5.10.2 Rauchdichte

Die quantitative Bewertung der Rauchdichte erfolgt mittels der Bestimmung der Masse an Feststoffteilchen pro Volumeneinheit. In der Feuerwehrpraxis wurde in früherer Zeit die Sichtweite für die Beurteilung der Rauchdichte benutzt. Hierbei wurde die Entfernung bestimmt, die bei einer bestimmten Lichtstärke noch gestattete, bestimmte Gegenstände zu erkennen.

Die Sichtbehinderung durch Brandrauch spielt auch weiterhin bei Feuerwehreinsätzen eine große Rolle, insbesondere im Zusammenhang mit der Auffindung von verletzten Personen in verrauchten Brandobjekten. Deshalb werden die Feuerwehren in immer stärkerem Maße mit Wärmebildkameras ausgerüstet, die selbst in relativ stark verrauchten Räumen das Auffinden von verletzten Personen gestatten.

Die Rauchdichte ist aber auch als ein brandbezogener Parameter zu verstehen, um die Rauchfreisetzung im Brandfall charakterisieren zu können. Insbesondere im Personentransportbereich aber auch in speziellen Bauwerken werden Werkstoffe bzw. Baustoffe gefordert, die im Brandfall nur wenig Rauch freisetzen und darüber hinaus soll dieser Rauch wenig toxisch wirken (Rauchbildungspotential). Als relevanter Parameter wurde die spezifische optische Rauchdichte eingeführt. Die spezifische optische Rauchdichte ist ein Maß für den Rauch, der von einer Materialprobe bzw. einem Produkt unter definierten Bedingungen (Prüfungsstandard) erzeugt wird (vgl. auch optische Rauchdichte). Die spezifische optische Rauchdichte ist eine dimensionslose Größe. Wegen einer Vielzahl spezieller Prüfmethode wie z. B. für den Schiffbau, den Bereich des Schienenfahrzeugbaus, die Verwendung von Kabeln u. a. wird auf eine detaillierte Beschreibung verzichtet (als Vorschriften wären zu nennen: für Seeschiffe – IMO FTPC Teil 2, unter Bezug auf EN ISO 5659-2:2006, Teil 2, für den Schienenfahrzeugbau – DIN EN 45545-2, Teil 2, für Kabel - EN 50268-2). Die Prüfung besteht im Allgemeinen in einer abgestuften Wärmestrahlungsexposition in einer Prüfapparatur mit bzw. ohne Zündflamme und der eigentlichen Rauchdichtemessung mittels einer Lichtmessstrecke über eine festgelegte Messzeit. In einschlägigen Standards werden auch Berechnungsmöglichkeiten für die Rauchdichte vorgestellt.

1.5.10.3 Rauchgastoxizität

Im gleichen Zusammenhang ist auch die Rauchgastoxizität zu nennen. Für die Toxizitätsmessungen werden je nach Prüfmethode Rauchgasproben aus dem Innern einer Messkammer innerhalb vorgegebener Zeitintervalle entnommen und analysiert (z. B. Prüfung der Rauchgastoxizität in der Prüfkammer nach DIN EN ISO 5659-2 (DIN 5510-2 : 2009-05) bzw. gemäß IMO FTPC Teil 2: Rauch und Toxizität), nachdem die maximale spezifische Rauchdichte erreicht worden ist bzw. die Rauchgase werden mit Beginn der Wärmestrahlungsexposition einem z. B. FTIR-Analysensystem zugeführt und hinsichtlich ihrer Zusammensetzung analysiert.

Die Wertung der Toxizität erfolgt auf der Grundlage eines Toxizitätsindex, der vergleichbar wie die spezifische Rauchgasdichte eine dimensionslose Größe ist. Der Toxizitätsindex T_i ergibt sich aus dem Quotienten von toxischer Gaskonzentration, die z. B. bei

Pyrolyse von 1 Gramm Brandstoff in 1 Kubikmeter Luft erreicht wird, und der letalen Konzentration bei 1/2-stündiger Exposition

$$T_i = C_e/C_f \quad (56)$$

C_e - Konzentration des toxischen Grases, das bei Pyrolyse von 1 Gramm Brandstoff in 1 Kubikmeter Luft gebildet wird

C_f - tödliche Konzentration bei 1/2-stündiger Exposition

Entsprechend vorgenanntem Standard (IMO FTPC Teil 2) wird für die Stoffbewertung hinsichtlich ihrer Rauchgastoxizität der CIT-Wert (Conventional Index of Toxicity) eingeführt. Der CIT-Wert eines Brandstoffs wird als Summe der einzelnen Bestandteile des Brandgases gebildet

$$CIT = 0,0805 \cdot \sum_{i=1}^8 \frac{C_{i,Kammer}}{C_{i,Referenz}} \quad (57), \text{ wobei}$$

$C_{i,Kammer}$ - Konzentration der i-ten Rauchgaskomponente in der Kammer nach 8 Minuten Prüfdauer in mg m^{-3} und

$C_{i,Referenz}$ - Referenzkonzentration der i-ten Rauchgaskomponente gemäß Tabelle in dem entsprechenden Standard in mg m^{-3}

bedeuten.

1.5.10.4 Klassifizierungskriterien für die Toxizität

Es werden bei diesen Untersuchungen gemäß Prüfung nach IMO FTPC – Teil 2 u. a. Grenzwerte für die Toxizität [1.15] zu akut inhalationstoxischen Rauchgasbestandteilen bestimmt, die nicht überschritten werden dürfen. Für CO_2 wird kein Grenzwert genannt.

Tab. 23: Grenzwerte entsprechend Prüfung nach IMO FTPC – Teil 2

Rauchgaskomponente	Konzentration in ppm
CO	1.450
HCl	600
HF	600
NO_x	350
HBr	600
HCN	140
SO_2	120

1.6 Brände in Räumen

Eine besondere Rolle bei der Entwicklung von Bränden in Räumen spielt das Luft- bzw. Sauerstoffangebot. Hinsichtlich des Verlaufs unterscheidet man brandstoffgesteuerte bzw. ventilationsgesteuerte Brände [1.16], [1.17], [1.18], [1.19]. Brandstoffgesteuerte Brände in Räumen verlaufen hinsichtlich Masseumsatz (Abbrandgeschwindigkeit), Wärmefreisetzung u. a. Brandkenngrößen ähnlich wie im Freien. So wird in Räumen mit großen Abmessungen aber endlichen Brandstoffmengen und in Räumen mit unbegrenzter Belüftung auf Grund des hohen Luftangebotes die Vollbrandphase immer erreicht. In Räumen mit einer optimalen Öffnungsfläche werden bei einem idealen Verhältnis von Brennstoffmasse und Luftangebot maximale Brandraumtemperaturen erreicht, was auch zu Höchstwerten für $v_{ab, spez}$ führt. Gleichermaßen erreichen die sich einstellenden Luftströmungsgeschwindigkeiten erhebliche Größenordnungen. Unter Umständen können die Werte von $v_{ab, spez}$ wegen der aufgeheizten baulichen Hülle – Wirkung wie die Wände einer technischen Feuerungsanlage – und der brandintensivierenden Wirkung der zuströmenden Luft höher als bei Bränden im Freien sein. Bei ventilationsgesteuerten Bränden (d. h. Brände in Räumen mit eingeschränkter bzw. begrenzter Belüftung) wird der Verlauf der Brandentstehungsphase zunächst durch das Luftangebot im Raum und später durch die über die Raumöffnungen einströmende Luftmenge bestimmt. Die „Ventilationssteuerung“ kommt somit erst nach dem Abbrand einer endlichen Brandstoffmasse, d. h. im Verlaufe des Brandes zum Tragen. Insbesondere bei kleinen Brandräumen mit sehr kleinen oder fehlenden Lüftungsöffnungen kann ein Brand auf Grund des Luftmangels bereits in seiner Entstehungsphase verlöschen bzw. bei Vorhandensein insbesondere glimmfähiger Stoffe wie Holz, Baumwolltextilien u. ä. sich in Richtung Schwelbrand entwickeln. Bei ventilationsgesteuerten Bränden ist hinsichtlich der vorgenannten Brandkenngrößen mit teilweise erheblich geringeren Beträgen zu rechnen. Auf Grund der bei ventilationsgesteuerten Bränden ablaufenden unvollständigen Verbrennung enthält das Rauchgas teilweise hohe Anteile an brennbaren und/oder toxischen Gase bzw. Dämpfen. Kommt es infolge thermischer Zerstörungen zur Ausbildung von Raumöffnungen, kann es durch den Luftzutritt zu einer extremen Beschleunigung der Brandausbreitung (teilweise explosionsartig) sowohl in den Brandgasen als auch über die Stoffoberflächen kommen (siehe **Backdraft, Flashover**). So wird z. B. in der Literatur beschrieben, dass Fensterglas infolge Einwirkung einer sich in Fensterhöhe ausbildenden Heißgasschicht mit einer Temperatur von etwa 300 °C nach ca. 5 Minuten bis 20 Minuten zerbricht und damit innerhalb kurzer Zeit die gesamte Fensterfläche als Öffnungs- und somit als Belüftungsfläche zur Verfügung steht. Dieser Sachverhalt ist insoweit zu relativieren, da letztendlich für den Zeitpunkt des Zerspringens des Fensterglases der von einer Heißgasschicht, von einem Heißgasstrom bzw. einer Flamme ausgehende thermische Impuls verantwortlich ist. Beim Nichtversagen einer Fensterverglasung kann sich, wie vorgenannt, ein Schwelbrand entwickeln.

Eine Randerscheinung bei ventilationsgesteuerten Bränden ist neben dem Austreten von Flammen aus dem Brandraum ein Brennen bzw. Mitverbrennen der aus den Raumöffnungen austretenden pyrolyseproduktthaltigen Rauchgase außerhalb der Raumöffnungen infolge der Nachvermischung mit Luft. Diese Flammenerscheinungen können natürlich auch zur Brandübertragung über die Fassaden beitragen (Flammenüberschlag).

1.6.1 Einfluss der Lüftungsverhältnisse bei Bränden in Räumen

Jeder Brandstoff benötigt in Abhängigkeit von seiner Menge einen für seine vollständige Verbrennung spezifischen Luftbedarf L_{Brd} (siehe Verbrennungsrechnung).

$$L_{Brd} = \frac{V_L}{m_{Brd}} \quad (58)$$

m_{Brd} - Brandstoffmasse in kg

L_{Brd} - Luftbedarf zur vollständigen Verbrennung in $\text{m}^3 \text{kg}^{-1}$

V_L - Luftmenge zur vollständigen Verbrennung in m^3

Hinsichtlich des Stoffumsatzes während der Brandentstehungsphase eines brandstoff-gesteuerten Brandes bewegen sich Angaben zwischen 20 % und 45 % der Ausgangsmasse. Im Weiteren wird mit einem gemittelten Wert von 30 % gerechnet. Daraus ergibt sich für die Zeit der Brandentstehungsphase:

$$t_E = \frac{0,3 \cdot m_{Brd}}{A_{Brd} \cdot \dot{m}_{rel}''} \quad (59)$$

A_{Brd} - Brandfläche in m^2

t_E - Dauer der Entstehungsphase in min

\dot{m}_{rel}'' - relative Abbrandgeschwindigkeit in $\text{kg m}^{-2} \text{min}^{-1}$

Unter Berücksichtigung, dass bei ventilationsgesteuerten Bränden keine ausreichende Luftzuführung möglich ist, gilt unter Bezug auf die Formel (Luftbedarf) für die Brandentstehungsphase:

$$t_E = \frac{0,3 \cdot V_R}{\beta \cdot L_{Brd} \cdot A_{Brd} \cdot \dot{m}_{rel}''} \quad (60)$$

V_R - Raumvolumen in m^3

β - Korrekturfaktor hinsichtlich der Unvollständigkeit der Verbrennung, wobei

$\beta = 0,8$ bis $0,9$ bei $L_{Brd} > 10 \text{ m}^3 \text{kg}^{-1}$, $0,9$ bis $0,95$ bei $10 \text{ m}^3 \text{kg}^{-1}$ bis $5 \text{ m}^3 \text{kg}^{-1}$ und $0,95$ bis $0,99$ bei $< 5 \text{ m}^3 \text{kg}^{-1}$

Da die Zeit der Brandausbreitung unmittelbar von der Zeit der Branddauer abhängig ist, lässt sich die Zeit für die Brandausbreitung t_E in vorgenannte Gleichung einsetzen.

So kann die Zeitdauer für die Entstehungsphase auch unter Einbeziehung einer mittleren Brandausbreitungsgeschwindigkeit v_{aus} bestimmt werden.

$$t_E = \frac{l_V}{v_{aus}} \quad (61)$$

v_{aus} - Brandausbreitungsgeschwindigkeit in m min^{-1}

l_V - Weg der Flammenfront in m

t_E - Zeit der Ausbreitung der Flammenfront in min

Diese Zeit t_E entspricht jedoch in den meisten Fällen nicht der Realität, da Verzögerungen bei der Brandausbreitung, die durch Abstände zwischen den brennbaren Stoffen bedingt sind, nicht berücksichtigt werden.

Für den Fall einer ungehinderten Brandausbreitung ist eine Auflösung der Gleichung in Richtung Tiefe der Brandausbreitung l_V möglich, so ergibt sich für die Brandausbreitung in Abhängigkeit vom Raumvolumen:

$$l_V = \frac{0,3 \cdot v_{aus} \cdot V_R}{\beta \cdot L_{Brd} \cdot A_{Brd} \cdot \dot{m}_{rel}''} \quad (62)$$

l_V - Ausbreitung der Flammenfront in Abhängigkeit vom Raumvolumen in m

Natürlich hängt die Brandausbreitung wesentlich von der Art der Materiallagerung und von der Branddauer ab. Bei einem genügend hohen Luftangebot (brandstoffgesteuerter Brand) kann l_V höchstens den Wert der ungestörten, linearen Brandausbreitung auf dem betrachteten Brandstoff erreichen.

1.6.2 Brände in Räumen ohne Raumöffnungen

Da das Luftangebot in solchen Räumen durch das Raumvolumen V_R bestimmt ist, ergeben sich zwei Möglichkeiten:

a) $V_R \geq V_L \quad (63)$

Die Luftmenge ist ausreichend für die Verbrennung des Brandstoffs, mindestens für eine bestimmte Zeitdauer. Die relative Abbrandgeschwindigkeit \dot{m}_{rel}'' in $\text{kg m}^{-2} \text{min}^{-1}$

ergibt sich dann zu:

$$\dot{m}_{rel}'' = \frac{m_{Brd}}{A_{Brd} \cdot t_{Brd}} \quad (64)$$

m_{Brd} - Brandstoffmasse in kg

A_{Brd} - Brandfläche in m^2

t_{Brd} - Zeit der ungehinderten Brandentwicklung in min

b) $V_R < V_L$ (65)

Die Luftmenge ist nicht ausreichend für die Verbrennung des gesamten Brandstoffes.

In diesem Fall ergibt sich unter Berücksichtigung des zur Verfügung stehenden Luftvolumens, des Raumvolumens V_R und β :

$$m_{Brd} = \frac{V_R}{\beta \cdot L_{Brd}} \quad (66), \text{ wobei}$$

m_{Brd} - verbrennende Brandstoffmasse in kg

V_R - Raumvolumen in m^3

Wird m_{Brd} zur Berechnung der Abbrandgeschwindigkeit \dot{m}'' eingesetzt, ergibt sich diese im Zusammenhang mit einem verringerten Luftvolumen zu

$$\dot{m}'' = \frac{V_R}{\beta \cdot L_{Brd} \cdot A_{Brd}} \quad (67)$$

Für die Berechnung der abnehmenden Branddauer ergibt sich unter Berücksichtigung des verringerten Luftvolumens:

$$t_{Brd,v} = \frac{V_R}{\beta \cdot L_{Brd} \cdot A_{Brd} \cdot \dot{m}''} \quad (68)$$

$t_{Brd,v}$ - sich verringemde Branddauer in min

Dies zeigt, dass bei vorgegebener Brandstoffmenge für den Fall $V_R < V_L$ mit Verbrauch des verfügbaren Raumluftvolumens sich die Abbrandgeschwindigkeit des Stoffes verringert und sich der Brand auch nicht über die verfügbaren Brandstoffoberflächen ausbreiten kann.

Bei Bränden in Räumen mit äußerst begrenzter oder keiner Lüftungsöffnung sind Annahmen insbesondere für den Faktor β von 1 bis 0,75 durchaus legitim. Bei noch geringeren Luftangeboten ist davon auszugehen, dass bestimmte Stoffe nicht mehr selbstän-

dig mit offener Flamme weiterbrennen oder nicht glutbildende Stoffe wie thermoplastische Kunststoffe wie Polyethylen oder PUR-Weichschaum und andere gänzlich verlöschen. So wird z. B. für PUR-Weichschaum ein Sauerstoffindex (Maßgröße für ein Weiterbrennen in einer Sauerstoff reduzierten Atmosphäre) – siehe Punkt 1.4.4.1, ein LOI = 0,16 angegeben. Unterhalb eines Sauerstoffgehaltes der Luft von 16 Vol.-% verlischt der bis dahin brennende Schaumstoff. Ein Übergang in einen Schwelbrand ist, wie vorgeannt, nur bei glutbildenden Stoffen wie Holz, Baumwolltextilien u. ä. möglich.

Räume ohne Raumöffnungen können z. B. Kabel- oder Rohrleitungsschächte sein. Bei derartigen Objekten können in der Regel infolge des weiteren Brandverlaufes auch keine Öffnungen entstehen.

Im Weiteren werden Räume betrachtet, deren Öffnungen verschließbar sind bzw. deren Verschlusseinrichtungen brandbedingt selbständig schließen und während des Brandverlaufes verschlossen bleiben (Räume mit Türen, Klappen, Luken u. a.).

Hierzu zählen keine Öffnungsverschlüsse, die keinen bzw. nur einen äußerst geringen Feuerwiderstand besitzen, d. h. bei denen es bei einer nur geringen thermischen Belastung zur Freigabe von Öffnungen kommt. Bezogen auf die Brandentstehungsphase entsprechen derartige Räume solchen ohne Raumöffnungen. In Räumen ohne Öffnungen bestimmen die Brandstoffmenge, die Art der Brandstofflagerung und das durch das Raumvolumen begrenzte Luftangebot die Brandentwicklung, d. h. welches Ausmaß die Brandausbreitung erreicht, wie viel Brandstoff verbrennt, wie sich die Branddauer und die erreichbare Brandintensität entwickeln. Ist das Luftangebot größer als das zur vollständigen Verbrennung eines oder mehrerer Brandstoffe notwendige, führt das zum völligen Abbrand. Bei einem kleineren Luftangebot verbrennt nur ein Teil des Brandstoffes in Form eines Flammenbrandes. Derartige Brände können in Abhängigkeit von den konkreten Brandstoffen in einen Schwelbrand übergehen. Grundsätzlich nimmt der Abbrand merklich ab, wenn die Sauerstoffkonzentration der Luft unter 16 Vol.-% sinkt. Bei deutlich geringeren Sauerstoffkonzentrationen bzw. bei einem stark verringerten Luftangebot kann eine Brandentwicklung (Brandentstehung) ausbleiben bzw. der Brand erlischt bereits in seiner Entstehungsphase.

1.6.3 Brände in Räumen mit Raumöffnungen

Bezogen auf im Brandfall in Räumen vorhandene bzw. sich ergebende Raumöffnungen lassen sich derartige Objekte wie folgt einteilen:

- Räume mit verfahrenstechnisch bedingten und ständig unverschlossenen Öffnungen und
- Räume mit verfahrenstechnisch bedingten aber stets verschlossenen Öffnungen, wobei die für den Verschluss eingesetzten Materialien keinen oder keinen nennenswerten Feuerwiderstand aufweisen

Hinsichtlich Brandentstehung und der weiteren Brandentwicklung wird auf die einleitenden Ausführungen in Punkt 1.6 – Brände in Räumen verwiesen. Reicht das Luftangebot zur vollen Brandausbreitung aus, wird der Raum einer hohen thermischen Belastung ausge-

setzt. Der sich über die Raumöffnungen vollziehende Gasaustausch wird hinsichtlich der Geschwindigkeit, dies bezieht sich sowohl auf den Lufteintritt durch die Öffnungen bzw. den Austritt der Abgase durch die gleichen bzw. vor allem die höher liegenden Öffnungen, auf Grund einer durch die jeweilige Gastemperatur bedingten Dichtedifferenz bestimmt. Hiermit sind die Dichte der heißen Rauchgase im Raum und die Dichte der kälteren Luft der umgebenen Atmosphäre gemeint. Dieser als Ventilationssteuerung bezeichnete selbstständig verlaufende Luftaustausch setzt das Brennen einer bestimmten Menge Brandstoff voraus. Grundlegende Untersuchungen zu Raumbränden belegen, dass bei bestimmten Raumgrößen mit definierten Öffnungsflächen z. B. für Holzkrippenbrände eine für die Ventilationssteuerung notwendige Mindestmenge an Brandstoff von etwa 150 kg pro m² Lüftungsöffnungsfläche erforderlich ist. Für andere Stoffe wurden Stoffmengen in deutlich abweichenden Größenordnungen ermittelt. Auch ist von einem beachtlichen Einfluss der Raumgeometrie auszugehen.

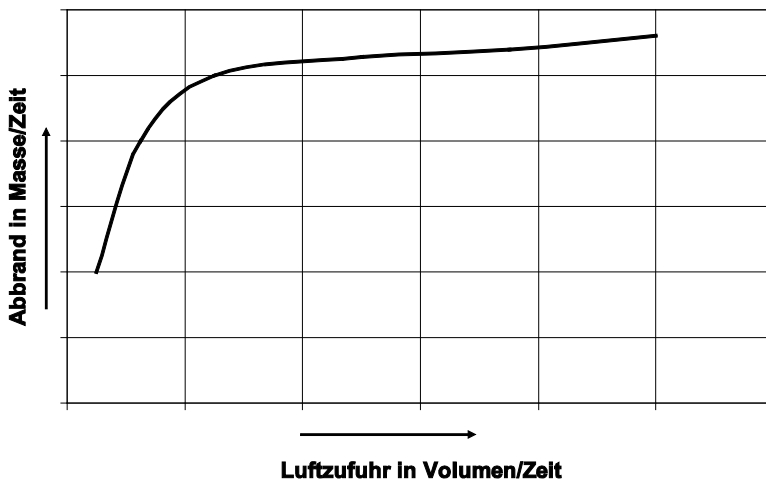


Abb. 40: Einfluss der Luftzufuhr auf den Abbrand eines Brandstoffes in Räumen mit begrenzter Lüftung – schematisch

Aus dem Kurvenverlauf wird ersichtlich, dass die Abbrandrate bis zu einem bestimmten Betrag der zuströmenden Luft stetig ansteigt (ventilationskontrolliert). Mit größer werdenden Öffnungsflächen nimmt die Abbrandrate in geringerem Maße zu, so dass sie sich asymptotisch einem konstanten Betrag annähert. Mit dem Erreichen einer konstanten Abbrandrate verläuft der Brand brandlastgesteuert. Wie schon ausgeführt, lässt sich mit der Wärmefreisetzung der zeitliche Verlauf der bei einem Brand frei werdenden Energie beschreiben. Daraus ergeben sich wiederum Möglichkeiten zur Beschreibung der Temperaturverteilung im Raum. Dies ist aber stets in Abhängigkeit solcher Randbedingungen wie Art und Menge der Brandlasten, den Ventilationsverhältnissen, der Geometrie des Brandraumes, der eigentlichen baulichen Hülle u. a. zu beurteilen. Auch die Durchführung von Löschmaßnahmen durch die Feuerwehr oder das Wirken von Löschanlagen beeinflussen den Temperaturverlauf eines Brandes.

So verdeutlicht die Abbildung 41 die Zeit bis zum Erreichen der maximalen Verbrennungstemperatur in Abhängigkeit von der Brandstoffmasse als indirekter Ausdruck für die Brandlast und die Ventilationsbedingungen.

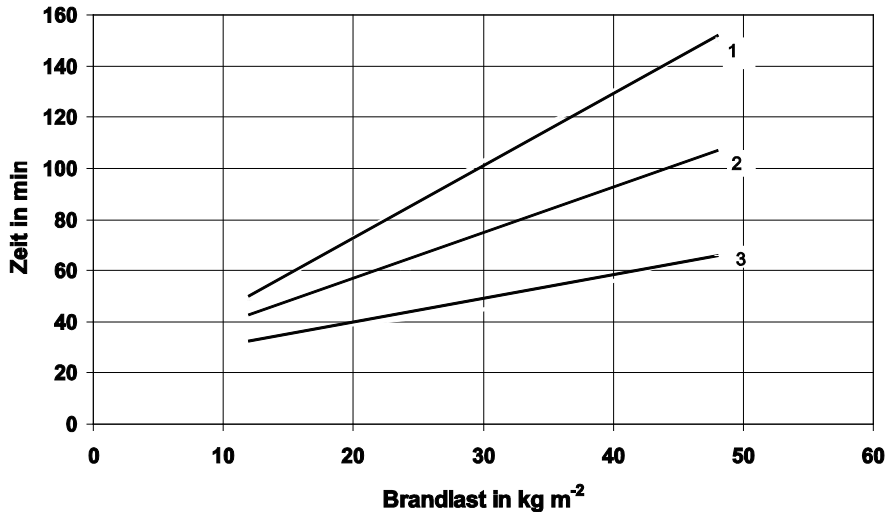


Abb. 41: Zeit bis zum Erreichen der maximalen Verbrennungstemperatur in Abhängigkeit von der Brandlast bei verschiedenen Ventilationsbedingungen – schematisch

Hierbei bedeuten: bei der Geraden 1: 6 % Öffnungsfläche, bei der Geraden 2: 12 % Öffnungsfläche und bei der Geraden 3: 24 % Öffnungsfläche, wobei der prozentuale Betrag das Verhältnis von Öffnungsfläche zur umbauten Fläche ausdrücken soll.

Grundsätzlich ergibt sich aus dieser Darstellung, dass mit steigender Brandlast die maximal möglichen Temperaturen später erreicht werden. Darüber hinaus wird deutlich, dass sich in dem Maße, wie sich der Ventilationsparameter und damit die Menge an einströmender Luft vergrößern, ein höherer Abbrand früher erreicht werden kann. Mit einer Verbesserung der Ventilationsbedingungen erhöhen sich auch die Beträge für die Brandausbreitungs- und die Abbrandgeschwindigkeit.

Nach der Zündung eines Brandmediums steigt die Brandraumtemperatur exponentiell mit der Brandzeit an. Der Anstieg der Temperaturkurve wird durch die Ableitung

$$dT/dt$$

charakterisiert, wobei T die Temperatur in K und t die Zeit in min bedeuten.

Idealisiert lässt sich dies durch die ETK darstellen – siehe auch Abb. 14, doch sind bei realen Raumbränden grundsätzlich wesentlich andere Temperaturverläufe zu erwarten. Dies zeigt die nachfolgende Abbildung. So wurden bei Brandversuchen des Autors in einem voll möblierten Wohncontainer nachfolgende Temperaturverläufe an der Decke in Längsrichtung nach Inbrandsetzung des Mobilars gemessen.

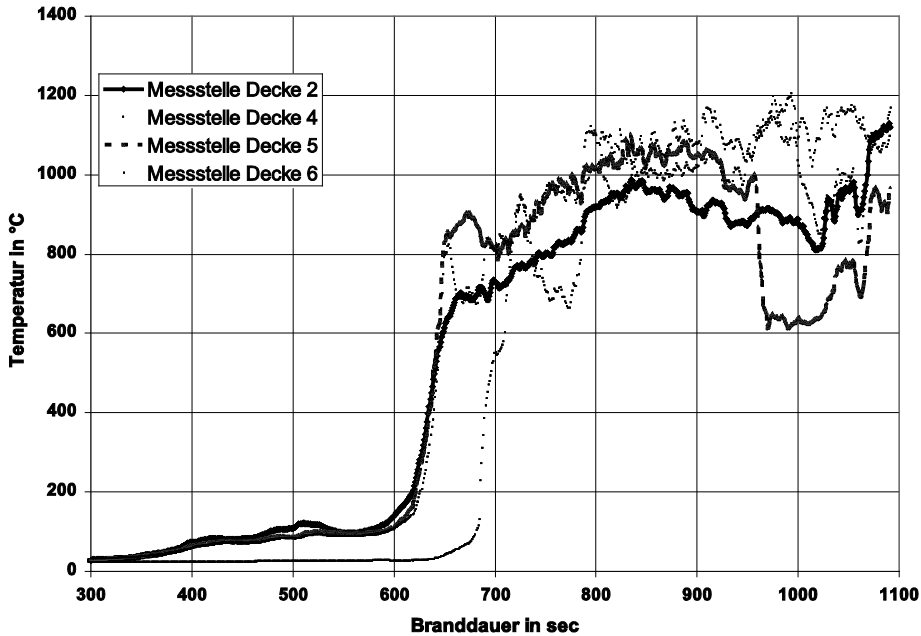


Abb. 42: Temperaturentwicklung im Raum bei einem Wohncontainerbrand

Grundsätzlich gilt zum Temperaturverlauf bei Bränden in Räumen (siehe auch Abbildung 13), dass während der Brandentstehungsphase die Temperatur steigt und sich mit dem Wirksamwerden des Einflusses der Raumöffnungen einem maximalen Wert nähert und sich im Zuge der Vollbrandphase über einen durchaus längeren Zeitraum kaum ändert, d. h. $dT/dt \rightarrow 0$. Mit dem brandbedingten Verbrauch der Brandlast nimmt die Temperatur später wieder ab.

1.6.4 Einfluss des Öffnungsverhältnisses auf den Brandverlauf

Auch bei Bränden in Räumen mit Öffnungen bestimmt zunächst das im Raum befindliche Luftvolumen den Brandverlauf. Erst wenn der für die Verbrennung benötigte Sauerstoff nicht mehr im ausreichenden Maße zur Verfügung steht, kommt die Ventilationssteuerung zum Tragen. Der weitere Brandverlauf wird durch die Querschnittsfläche der Raumöffnungen bestimmt, über die sich Luftzuführung realisiert. Für einen einfachen Modellfall werden die Lage der Öffnung und ihre geometrische Abmessung in Abbildung 45 dargestellt.

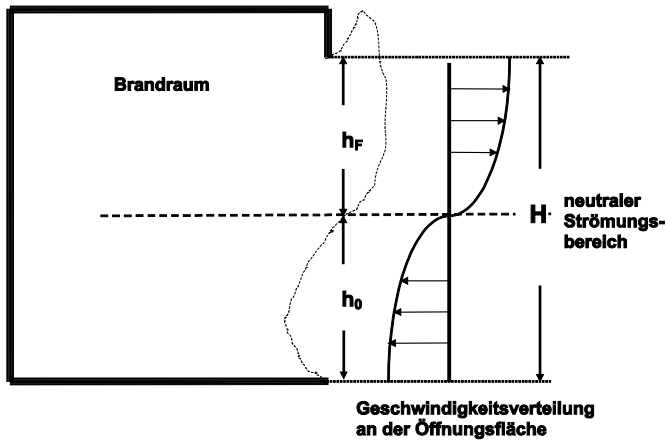


Abb. 43: Belüftungsschema für einen Brandraum - Vertikalschnitt

Bei einem ventilationsgesteuerten Brand wird der Stoffumsatz und somit die Energiefreisetzung insbesondere in Form von Wärme durch das Volumen der einströmenden Luft begrenzt.

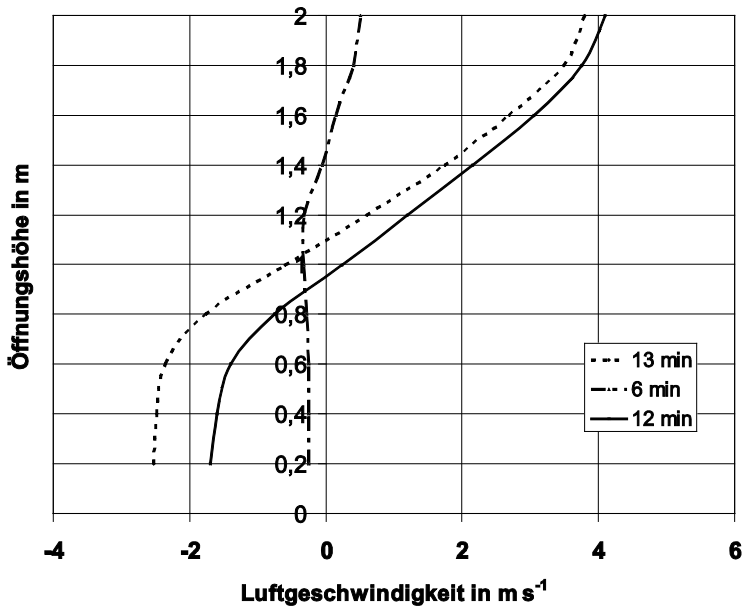


Abb. 44: Geschwindigkeitsverteilung an einer Brandraumöffnung bei den angegebenen Brandzeiten bei einem Brandversuch

Für den Massenstrom, der in den Brandraum über die vorhandenen Öffnungen eintritt, kann auf Grund vieler Untersuchungsergebnisse angenommen werden:

$$\dot{m}_a = K \cdot A_w \cdot \sqrt{h_w} \quad (69), \text{ wobei}$$

K - 0,52 in $\text{kg min}^{-1} \text{m}^{-5/2}$

\dot{m}_a - Massestrom der Luft in den Brandraum in kg/min

A_w - Öffnungsfläche in m^2

h_w - Höhe der Raumöffnung in m

In Kenntnis der benötigten Luftmenge für die Verbrennung pro kg Brennstoff lässt sich die maximal freisetzbare Energie bestimmen. Aus Experimenten ist bekannt, dass der Luftbedarf r für holzartige Brandlasten bzw. Holzmöbel, wie sie in Wohn- und Bürogebäuden hauptsächlich vorkommen, $r = 5,2 \text{ kg Luft/kg Brennstoff}$ beträgt. Bei vollständigem Luftverbrauch ergibt sich ein Abbrand von

$$\dot{m} = \frac{\dot{m}_a}{r} = \frac{0,52}{5,2} \cdot A_w \cdot \sqrt{h_w} = 0,1 \cdot A_w \cdot \sqrt{h_w} \quad \text{in } \text{kg min}^{-1} \quad (70)$$

\dot{m} - Abbrandrate in kg min^{-1}
(teilweise in der Literatur auch $A_w \cdot \sqrt{h_w} = \dot{m} = 5,5 \text{ kg min}^{-1}$)

Eine Einführung der relativen Abbrandgeschwindigkeit ist entsprechend der unter Punkt 1.5.4 beschriebenen Zusammenhänge möglich. In der Literatur [1.12], werden für den Koeffizienten K (Dimension – siehe vor) Werte zwischen 0,095 und 0,1 angeführt. Dabei liegt der mittlere Wert bei verschiedenen Raumgrößen und Brandstoffen (Holzstapel, Möbel, Hartfaser- und Isolierplatten) bei $K = 0,1 \text{ kg min}^{-1} \text{m}^{-5/2}$. Bei sehr kleinen Raumöffnungen sind Koeffizienten zwischen 0,15 bis 0,166 möglich. Insgesamt wurde gefunden, dass zur selbständigen Luftregulierung eine Mindestmenge Brandstoff pro Quadratmeter Öffnungsfläche erforderlich ist. Bei Holz beträgt die Menge maximal 150 kg pro m^2 Öffnungsfläche. Je kleiner die Öffnungsfläche ist, desto länger ist die Branddauer. Diese wichtige Schlussfolgerung zeigt, dass sich der Brand z. B. in Lagerräumen mit relativ kleiner Fensterfläche oder in solchen ohne Fenster langsamer ausbreitet als beispielsweise in einem Wohngebäude.

In Abbildung 45 ist die Abhängigkeit der Abbrandrate vom Ventilationsfaktor $A_w \cdot \sqrt{h_w}$ schematisch dargestellt. Dabei zeigt sich, dass die Abbrandrate nur in einem bestimmten Bereich des Ventilationsparameters linear von der zugeführten Luftmenge abhängig ist.

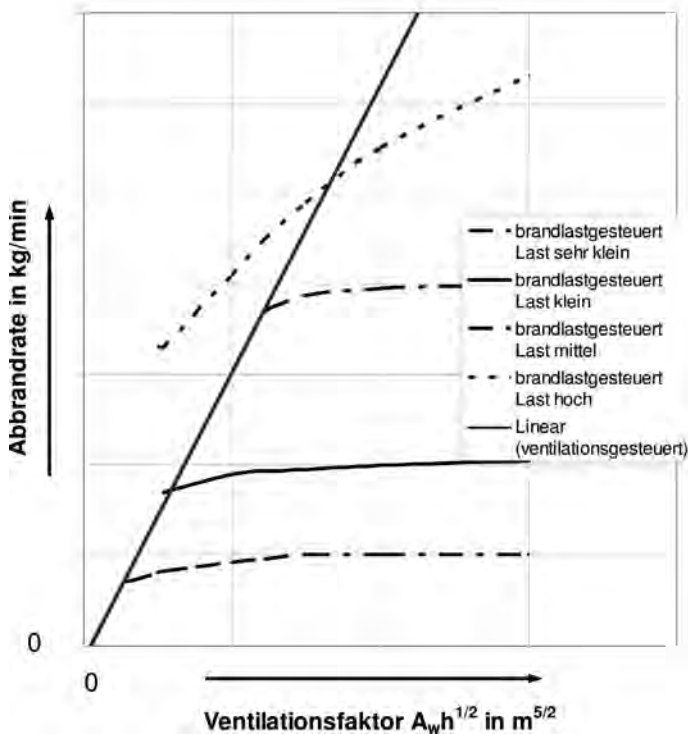


Abb. 45: Abhängigkeit des Abbrands vom Ventilationsfaktor $A_W \cdot \sqrt{h_W}$ bei verschiedenen Brandlasten – schematisch

Unter Einbeziehung der gesamten Fläche der Umbauung A_T wurde gefunden, dass ein Brand nur dann ventilationskontrolliert verläuft, wenn die Öffnungsfläche 5 bis 25 % der umbauten Grundfläche des Raumes beträgt. Beträgt die Öffnungsfläche 25 % und mehr der umbauten Grundfläche des Raumes, ist die Luftzuführung ausreichend groß, so dass der Raumbrand brandstoffkontrolliert, d. h. wie im Freien verläuft. Wird die Brandstoffmasse innerhalb des Gebäudes erhöht, ohne die Raumgröße zu ändern, ist der Brandverlauf wiederum ventilationskontrolliert.

1.7 Besondere Raumbrandszenarien

Zum Brandverhalten der in einem Brandraum befindlichen Brandstoffe ist zu bemerken, dass solche Stoffe wie Holz in der Lage sind, trotz Änderung z. B. des Sauerstoffgehaltes in der Luft mit verminderter Geschwindigkeit weiterzubrennen. So ist selbst bei einem Sauerstoffgehalt von 12 % für Holz noch von einer Abbrandgeschwindigkeit von $0,15 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$ auszugehen. Im Vergleich dazu beträgt die Abbrandgeschwindigkeit für Holz bei einem Sauerstoffgehalt von 21 % ca. $0,5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$. Zu beachten hierbei ist, dass mit abnehmenden Sauerstoffgehalt sich der Grad der Vollkommenheit der Verbrennung verringert, d. h. die Rauchgase enthalten noch brennbare Bestandteile. Als ein weiteres Indiz für eine unvollkommene Verbrennung sprechen die Rußniederschläge an den

Innenwänden und insbesondere an den Außenwänden im Bereich oberhalb der Raumöffnungen. Diese Sachverhalte geben Anlass, u. a. von einer Freisetzung brennbarer, gasförmiger Produkte auszugehen, zu deren Menge und qualitativer Zusammensetzung eher selten exakte Aussagen gemacht werden können. Es ist unter dem Aspekt des eingeschränkten Brennens (Glimm- oder Schwelbrand) von Holz und holzartigen Stoffen sowie der zu erwartenden Pyrolyse insbesondere bei Anwesenheit von Polymermaterialien ein breites Stoffspektrum an Freisetzungprodukten zu erwarten – siehe auch Punkt 1.5.8.2. So können neben CO, H₂, Essigsäure, Acrolein, aromatische Kohlenwasserstoffe, aliphatische Kohlenwasserstoffe, weitere Aldehyde und organische Säuren sowie Produkte der vollkommenen Verbrennung wie Wasserdampf und CO₂ freigesetzt werden.

Insbesondere stellt sich, wie vorgenannt, bei Raumbränden die Frage, welche Gründe zur Auslösung von speziellen Folgebränden führen.

Bei solchen Folgebränden können durch eine oft spontane Intensivierung des Brandes thermische Effekte auftreten, die zu gesundheitlichen Schädigungen (Verbrennungen) der in solchen Räumen befindlichen Personen bzw. der Feuerwehrbediensteten im Brandeinsatz führen. Weiterhin können solche Verläufe zu einer Eskalation des Brandes im Sinne einer weiteren Schädigung der Bausubstanz und Ausstattung beitragen.

In der Literatur werden derartige Brandverläufe mit einer spontanen Verlaufscharakteristik und den vorgenannten Wirkungen grundsätzlich durch die nachfolgenden speziellen Branderscheinungsformen beschrieben [1.12], [1.20], [1.21], [1.22]:

- **Flashover**
- **Backdraft**
- **Verpuffung**

wobei nicht zwischen einer Verpuffung von Pyrolysegasen oder anderen zündfähigen Gasen und Dämpfen differenziert wird.

1.7.1 Flashover

Unter Flashover wird ein Verbrennungsablauf verstanden, bei dem infolge eines in einem Raum wirkenden Brandes eine thermische Aufbereitung der brennbaren Stoffe in der Weise erfolgt, dass im weiteren Brandverlauf eine schlagartige Flammenausbreitung angenommen werden kann. Als Randbedingungen werden eine entsprechende Wärmestromdichte in Richtung Oberfläche der brennbaren Stoffe und eine daraus resultierende Oberflächentemperatur aller im Raum befindlichen brennbaren Gegenstände zwischen 560 °C und 600 °C und die Freisetzung einer ausreichenden Menge an brennbaren Pyrolysegasen genannt, wobei die Pyrolyse der im Raum befindlichen Gegenstände vor allem auf die Wärmestrahlung der im Deckenbereich befindlichen Heißgas-schicht zurückzuführen ist. Im Weiteren verläuft der Brand ausschließlich ventilationskontrolliert und ist charakterisiert durch die nachfolgenden äußeren Erscheinungsmerkmale, d. h. Stoff- und Wärmeaustausch mit der Umgebung vollziehen sich durch die im Raum befindlichen Öffnungsflächen und die primäre, spontane Flammenausbreitung erfolgt vorzugsweise im Bereich der unverbrannten im Deckenbereich befindlichen

brennbaren Gase und Dämpfe. Dass darüber hinaus infolge der schlagartigen Flammenausbreitung mit einer spontanen Volumenvergrößerung der Rauchgase und mit einem kurzzeitigen Druckanstieg (ca. 50 Pascal) gerechnet werden muss, ist nachdrücklich hervorzuheben. Die durchschnittliche Wärmefreisetzung bewegt sich im Bereich von 2 MW bis 3 MW. In der Literatur werden folgende Eintrittsbedingungen für einen Flashover genannt:

- eine hinreichend vorhandene Brandlast von mehr als 60 MJ m⁻² (siehe DIN 18230), wobei nach eigenen Erfahrungen mehr als 250 MJ m⁻² notwendig waren
- ein ausreichendes Sauerstoffangebot
- ein primäres (Raumgröße) und sekundäres Frischluftvolumen (Öffnungen wie Fenster, Tür)
- eine Wärmeaufnahme der Wände
- eine Heißgasschicht mit Temperaturen von mehr als 550 °C unter der gesamten Decke des Raumes

Hinsichtlich des Eintritts eines **Flashover** bedingt durch Wärmestrahlung der sich ausbildenden Heißgasschicht werden Werte für die wirksame Wärmestrahlung im Bereich des Fußbodens von ca. 25 kW m⁻² bis 30 kW m⁻² angenommen. Bei einer Durchzündung in einem Brandraum wird von einer durchschnittlichen Strahlungsintensität resultierend aus der Heißgasschicht von über 40 kW m⁻² ausgegangen.

Selbst große (einzelne) brennende Objekte emittieren in einem solchen Maße Wärmestrahlung, dass (ohne direkten Kontakt) eine unmittelbare Zündung benachbarter Gegenstände eintreten kann, da dort infolge der Absorption der Wärmestrahlung die Zündtemperatur erreicht bzw. überschritten wird.

So wurde z. B. bei einem durchschnittlich möblierten Brandraum (Brandlast ca. 350 MJ m⁻²) mit einem Volumen von ca. 34 m³ (13 m² Fläche, 2,6 m hoch) und einer Öffnung von ca. 3,0 m² (Fenster und teilgeöffnete Tür) der Eintritt eines Flashover bei Erreichen einer Wärmeleistung von ca. 2 MW und einer Temperatur der Heißgasschicht zwischen 500 und 600 °C nach ca. 12 Minuten beobachtet.

Ausgehend von der Stoff- und Wärmebilanz für die Entwicklungsphase eines Raumbrandes oder anders ausgedrückt für das Stadium Preflashover wird in der Literatur ([1.8], [1.16], [1.17], [1.20], [1.21]) für die sich aus dem Masseumsatz an brennbarem Stoff realisierende Wärmefreisetzung folgender Berechnungsansatz beschrieben – siehe auch Punkt 1.5.5:

$$\dot{m}'' = (Q_F'' + Q_E'' - Q_L'') / L_V \quad (71), \text{ wobei}$$

\dot{m}'' - die flächenbezogene Abbrandgeschwindigkeit in kg m⁻² min⁻¹

Q_F'' - Wärmezufuhr aus der Flamme auf die Brandstoffoberfläche in kJ m⁻² min⁻¹,

Q_E'' - externe Strahlungswärme z. B. von heißen Raumwänden in kJ m⁻² min⁻¹,

Q_L'' - Wärmeverluste an die Umgebung in kJ m⁻² min⁻¹,

L_V - Verdampfungs- und Pyrolysewärme in kJ kg^{-1}

bedeuten.

Für die durch den Brand freiwerdende Wärme kann angenommen werden:

$$\dot{Q} = m_B \cdot \Delta h_c \quad (72)$$

\dot{Q} - Wärmefreisetzungsrate des Brandes in kW

m_B - Abbrandrate des Brandstoffes in kg min^{-1}

Δh_c - effektive Verbrennungswärme des Brandstoffes in kJ kg^{-1}

Die Unterscheidung zwischen **Pre- und Postflashover compartment fire temperatur** ist als separater Bezug auf die verschiedenen Brandstadien und die dabei ablaufenden Wärme- und Stofftransportprozesse zu verstehen, wobei die Berechnung einer **Pre-flashover compartment fire temperatur** mittels der nachfolgenden Gleichung möglich ist.

$$\dot{Q} = \dot{m}_G \cdot c_p (T_G + T_0) + q_{\text{verl}} \quad (73)$$

\dot{Q} - Gesamtwärmefreisetzungsrate des Brandes in kW

\dot{m}_G - aus Raumöffnung ausströmender Gasfluss in kJ min^{-1}

c_p - spez. Wärme des Gases in $\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$

T_G - Temperatur der im Deckenbereich befindlichen heißen Gasschicht in K

T_0 - Temperatur innerhalb des Raumes in K

q_{verl} - aus der Heißgasschicht übertragene Strahlungs- und konvektive (Nettowärme in kW)

mit $q_{\text{verl}} = h_k A_W (T_G - T_0) \quad (74),$

wobei

h_k - effektive Wärmeleitfähigkeit für die Baumaterialien der Wände in $\text{kW m}^{-1} \text{K}^{-1}$

A_W - Summe der den Brandraum umschließenden Wände in m^2

bedeuten.

Unter Berücksichtigung weiterer Randbedingungen für den Gasaustausch über die Raumöffnungsflächen und einer Korrelation mit Daten aus einer Reihe von Experimenten wurde für den austretenden Gasstrom \dot{m}_G folgende Proportionalität gefunden:

$$\dot{m}_G \approx \sqrt{g \cdot \rho_0} \cdot A_W \cdot \sqrt{H_0} \quad (75), \text{ wobei}$$

g - Erdbeschleunigung - $9,81 \text{ m s}^{-2}$

ρ_0 - Dichte der Raumluft in kg m^{-3}

H_0 - Öffnungshöhe in m

bedeuten.

Aus den vorgenannten Gleichungen ergibt sich nachfolgender Berechnungsansatz, wobei dieser Ansatz aufgrund seiner experimentellen Grundlage **nur für brandlastgesteuerte Brände in kleinen Räumen gilt, bei denen $600 \text{ }^\circ\text{C}$ nicht überschritten werden:**

$$\frac{\Delta T}{T_0} = 1,6 \left(\frac{\dot{Q}}{\sqrt{g \cdot c_{p0} \cdot \rho_0 \cdot T_0 \cdot A_0 \cdot \sqrt{H_0}}} \right)^{2/3} \cdot \left(\frac{h_k \cdot A_W}{\sqrt{g \cdot c_{p0} \cdot \rho_0 \cdot A_0 \cdot \sqrt{H_0}}} \right)^{-1/3}$$

oder

$$\Delta T = 480 \left(\frac{\dot{Q}}{\sqrt{g \cdot c_{p0} \cdot \rho_0 \cdot T_0 \cdot A_0 \cdot \sqrt{H_0}}} \right)^{2/3} \cdot \left(\frac{h_k \cdot A_W}{\sqrt{g \cdot c_{p0} \cdot \rho_0 \cdot A_0 \cdot \sqrt{H_0}}} \right)^{-1/3}$$

(76), wobei

$$h_k = \sqrt{\frac{c_{pst} \cdot \rho_{st} \cdot \lambda_{st}}{\tau}} \quad \text{bedeutet.}$$

Es gilt aber zu berücksichtigen, dass die berechnete Temperaturerhöhung eine mittlere Raumtemperatur repräsentiert. Im realen Brandfall ist von einer Temperaturschichtung im Brandraum auszugehen, wobei bis zum Eintritt eines Flashover die Deckentemperatur um ein Mehrfaches höher liegen kann als die Temperatur im Bodenbereich. Die errechnete mittlere Raumtemperatur bringt aber auch zum Ausdruck, dass innerhalb eines bestimmten Zeitintervalls die Bedingungen für den Eintritt eines Flashover erreicht werden können. Der Faktor 1,6 ($480/T_0$) und die Exponenten $2/3$ sowie $-1/3$ sind ebenfalls das Resultat einer Ergebniskorrelation aus einer Vielzahl von Experimenten.

Eine Vereinfachung wird erzielt, indem für die nachfolgenden konstanten Größen die bekannten Größenordnungen in der Gleichung 79 verwendet werden ($g = 9.81 \text{ m s}^{-2}$, $\rho_0 = 1.2 \text{ kg m}^{-3}$, $T_0 = 293 \text{ K}$ und $c_p = 1.05 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$). Daraus ergibt sich:

$$\Delta T = 6,85 \left(\frac{\dot{Q}^2}{A_0 \cdot \sqrt{H_0} \cdot h_k \cdot A_W} \right) \quad (77)$$

Hiermit lässt sich gut die für einen Flashover-Eintritt notwendige Temperaturerhöhung abschätzen.

Eine Abschätzung der für einen Flashover-Eintritt notwendigen Energie wird durch Festlegung eines Temperaturanstieges von $\Delta T = 500 \text{ °C}$ und das Einsetzen in Gleichung 77 möglich.

$$\dot{Q}_{Fo} = 610 = (h_k \cdot A_0 \cdot A_W \cdot \sqrt{H_0}) \quad (78)$$

In Bezug auf eine Anwendung der vorgenannten Gleichungen im Sinne einer Abschätzung dieser speziellen Brandverläufe wird auf die vorgenannten Literaturquellen und auf [1.19] verwiesen, insbesondere auch in Hinblick auf eine Abschätzung des Eintrittzeitpunktes eines Flashover.

Hinsichtlich des Postflashover-Stadiums ist davon auszugehen, dass der vorhandene Brand, bedingt durch den sich einstellenden Luftwechsel über die Öffnungsflächen des Brandraumes, streng lüftungsgesteuert verläuft. Die sich unter diesen Bedingungen für diese Brandphase einstellende Abbrandrate und sich damit ergebende Wärmefreisetzung kann wie folgt ausgedrückt werden:

$$\dot{m} = (Q_F'' + Q_E'' - Q_L'') \cdot A_F / L_V \quad (79),$$

wobei

\dot{m} - Abbrandrate in kg s^{-1}

\dot{Q}_{Fl}'' - Wärmezufuhr aus der Flamme auf die Brandstoffoberfläche in $\text{kJ m}^{-2} \text{min}^{-1}$,

\dot{Q}_E'' - externe Strahlungswärme von den heißen Raumwänden in $\text{kJ m}^{-2} \text{min}^{-1}$,

\dot{Q}_L'' - Wärmeverluste an die Umgebung in $\text{kJ m}^{-2} \text{min}^{-1}$,

L_V - Verdampfungs- und Pyrolysewärme in $\text{kJ m}^{-2} \text{min}^{-1}$,

A_F - Fläche des Brennstoffbettes in m^2 bedeuten.

bedeuten

Für den Lufteintrag \dot{m}_{air} in den Brandraum gilt:

$$\dot{m}_{air} = 0,5 A_W \cdot \sqrt{H} \quad (80),$$

wobei

A_W - Öffnungsfläche des Brandraumes in m und

H - Höhe der Ventilationsöffnung in m

bedeuten. Der Faktor 0,5 ist ebenfalls als Resultat einer Ergebniskorrelation aus einer Vielzahl von Experimenten zu verstehen.

1.7.2 Backdraft

Unter Backdraft wird eine spontane Brandentwicklung mit Stichflammenerscheinungen in einem Raum verstanden. Hierbei kommt es zu einer spontanen Entzündung von im Brandraum befindlichen Pyrolysegasen infolge deren Vermischung mit der einströmenden Luft über eine plötzlich entstehende Öffnung. Die Zündung kann einerseits allein durch die hohe Ausgangstemperatur der Pyrolysegase in Form einer Wärmezündung, d. h. infolge der vorhandenen erhöhten Zündbereitschaft - siehe auch Punkte 1.4.2.6 sowie 1.4.2.11, als auch durch im Raum vorhandene Zündquellen zustande kommen. Letztere Möglichkeit ist bei einer stärkeren Abkühlung der Pyrolysegase entscheidend. In der Literatur wird neben einer rückläufigen Brandverlaufscharakteristik auch ein Fehlen von offenen Flammen eingeräumt. Detaillierte Angaben oder Berechnungsmodelle fehlen. Als signifikantes Unterscheidungsmerkmal zum Flashover wird vor allem das Durchzünden nach einem spontanen Luftzutritt herausgestellt. Weiterhin werden eine Wärmeleistung in Größenordnungen von ca. 4 MW im Zusammenhang mit einer Flammentemperatur der Stichflamme von mehr 1500 °C sowie ein Flammenausstritt über die Raumöffnung beschrieben, über die auch der Frischlufteintrag erfolgte.

Das auch im Zusammenhang mit Raumbränden auftretende Ereignis einer Verpuffung, d. h. das durch eine Zündquelle ausgelöste Abbrennen eines entstandenen Gemisches aus brennbaren Pyrolysegasen bzw. anderen brennbaren Gasen und Dämpfen mit Luft, ist als ein Sonderfall einer Raumexplosion anzusehen. Grundsätzlich kann Pyrolysegas mit seinem vorgenannten Stoffspektrum im Falle des Vorliegens oder der spontanen Bildung eines zündfähigen Gemisches mit Luftsauerstoff bei Einwirkung einer Zündquelle gezündet werden und anschließend schlagartig mit einer visuell wahrnehmbaren Flammenfront verbrennen. Kennzeichnend für eine Verpuffung ist, dass im Vergleich zur klassischen Explosion der Druck infolge der Volumenexpansion bei der Verbrennung deutlich kleiner ist, wobei sich die Flammenfortpflanzungsgeschwindigkeit im Bereich zwischen 4 bis 10 m·s⁻¹ und der zu erwartende Druck bei ca. 10 Pa bewegen und damit deutlich geringer als bei Explosionen sind. Ebenfalls kann mit einer deutlich geringeren Druckanstiegsgeschwindigkeit als bei einer Explosion gerechnet werden. Die Druckwirkung selbst hält im Vergleich zu Explosionen länger an. Nachfolgende Inbrandsetzungen, insbesondere von entflammaren Stoffen bzw. von thermisch vorbereiteten brennbaren Materialien, sind infolge des Einwirkens der sich ausbreitenden Flammenfront wahrscheinlich. Gemessen an diesen Feststellungen und in Auswertung entsprechender Ereignisse sind Verbrennungsverletzungen bei Personen in stärkerem Maße festgestellt worden als Verletzungen durch die Druckwelle bzw. das explosionsbedingte Einwirken massiver Körper.

Literatur

Es wird darauf verwiesen, dass die im fortlaufenden Text zitierten und nachfolgend aufgeführten Quellen nur die wesentlichsten Literaturstellen repräsentieren. Das Studium weiterer sich aus den ausgewiesenen Primärquellen ableitenden Quellen ist somit angezeigt, weil dort weiterführende Sachverhalte erläutert werden.

[1.1] Demidov, P. G. und Sauschew, W. S.: Verbrennung und Eigenschaften brennbarer Stoffe, Staatsverlag der DDR, Berlin 1980

[1.2] Brötz, W. und Schönbacher, A.: Wärme- und Stofftransport in Tankflammen, Chemie Ingenieur Technik, 50 (1978), Nr. 8

[1.3] Schönbacher, A.; Brötz, W. u. a.: Erforschung von Schadenfeuern flüssiger Kohlenwasserstoffe als Beitrag zur Sicherheit von Chemielagern, Chemie Ingenieur Technik, 57 (1985), Nr. 10

[1.4] Schönbacher, A.: Einführung in Strahlungsmodelle bei Bränden – Quellterme und Berechnung, Sicherheitstechnischer Erfahrungsaustausch, LUBW, Karlsruhe, 2010, http://www.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/68807/06_Schoenbacher.pdf?command=downloadContent&filename=06_Schoenbacher.pdf

[1.5] Werthenbach, H.G.: Brände von Erdölprodukten in Tanks - Versuche und Rechenmodell, Brandschutzforschung der Bundesländer – Berichtsnummer 21 Forschungsstelle für Brandschutztechnik an der Universität Karlsruhe (TH) 1971

[1.6] Leitfaden – Empfehlungen für Abstände zwischen Betriebsbereichen nach der Störfall-Verordnung und schutzbedürftigen Gebieten im Rahmen der Bauleitplanung – Umsetzung § 50 BImSchG, Erarbeitet von der Arbeitsgruppe „Fortschreibung des Leitfadens SFK/TAA-GS-1“, im November 2010 von der KAS verabschiedet, KAS-18

[1.7] Heskestad, G.: Fire Plumes, SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 2nd ed., National Fire Protection Association, Quincy, MA, 1995.

[1.8] Karlson, B. and Quintiere, J. G.: Enclosure fire dynamics, Verlag CRC Press, 2000

[1.9] Autorenkollektiv: Brandschutz – Formeln und Tabellen, Staatsverlag der DDR, Berlin 1979

[1.10] Blinov, V. I. and Chudjakov, G. N.: Certain laws governing diffusive burning of liquids, Doklady Akademiia Nauk, SSR Doklady (1957) 1094–1098.

[1.11] Bussenius, S.: Wissenschaftliche Grundlagen des Brand- und Explosionsschutzes, Kohlhammer, Stuttgart, Berlin, Köln, 1996

[1.12] Drysdale, D.: An Introduction to Fire Dynamics, 2 edit., John Wiley and Sons, New York, 1999

- [1.13] Verbrennungstechnik I – Verbrennungsrechnung
Leibniz Universität Hannover – Institut für Technische Verbrennung
http://www.itv.uni-hannover.de/studium/lehrveranstaltungen/Verbrennungstechnik_1/Verbrennungsrechnung.pdf
- [1.14] Richtlinie 10/03 „Schadstoffe bei Bränden“, Referat 10 der Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes – vfdb, Stand Mai 2009
- [1.15] http://www.firete.com/en/detail2_176.html
- [1.16] Thomas, P. H. and Heselden, A. J. M.: Fully Developed Fire in single Compartments, Fire Research Note No. 923, Fire Research Station, Borehamwood, England, 1972
- [1.17] Thomas, P. H.: On the Rate of Burning of Cribs, Fire Research Note 965, Fire Research Station, Borehamwood, England 1973
- [1.18] Bengtsson, L.-G.: Enclosure fires, Swedish Rescue Services Agency, 2001
- [1.19] Leitfaden – Ingenieurmethoden des Brandschutzes, Technischer Bericht – vfdb, 2. Auflage Mai 2009, Hosser, D. (Hrsg)
- [1.20] McCaffrey B.J.; Quintiere, J.G., and Harkleroad, M.F.: Estimating Room Temperatures and the Likelihood of Flashover using Fire Test Data Correlations, Fire Technology, 17, 1981, pp 98-119
- [1.21] Babrauskas, V.: Estimating room flashover potential, Fire Technol. 15 (1980) 5, S. 94, 1990
- [1.22] Fleischmann, C. M.: Backdraft Phenomena, NIST-GCR-94-646, University of California, Berkeley CA, 94720

Weitere Quellen:

Babrauskas, V.: Burning Rates in The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, National Fire Protection Association, Quincy MA , 1990

Bartknecht, W.: Explosionsschutz-Grundlagen und Anwendung, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, London, Paris, Tokyo, Hong Kong, Barcelona, Budapest, 1993

Bijl, L. J.: Uit de Brand – Handboek Brandonderzoek, Koninklijke Vermande BV – Iutgevers – Lelystad, 1987

Björkmann, J. und Keski-Rahkonen, O.: Test method for self ignition of materials, Sixth International Fire Conference Interflam 1993, Interscience communications limited, London, 1993

Bond, J.: Sources of Ignition, Butterworth-Heinemann Ltd. Oxford, London, Gulford, 1991

Bowen, J. E.: The Backdraft a new look at an old danger, Fire Engin.; New York 139 (1986)10

Bussenius, S.: Brand- und Explosionsschutz in der Industrie, Staatsverlag der DDR, Berlin, 1989

Cicha, J.: Die Ermittlung von Brandursachen, Richard Boorberg Verlag GmbH & Co KG, 2004

Cowie, J. M. G.: Chemie und Physik der synthetischen Polymeren, Vieweg-Verlag, Braunschweig/Wiesbaden 1997

DeHaan, J. D.: Kirk's Fire Investigation, 7th ed. Pearson/Prentice Hall, 2007

DIN 14011 Begriffe aus dem Feuerwehrwesen, Beuth Verlag GmbH, Berlin, Köln

DIN 18230 Baulicher Brandschutz im Industriebau – Teil 1 Rechnerisch erforderliche Feuerwiderstandsdauer und Teil 2 Ermittlung des Abbrandfaktors m, Beuth Verlag GmbH, Berlin, Köln

DIN 4102 Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen, Beuth Verlag GmbH, Berlin, Köln

Dominghaus, H.: Die Kunststoffe und ihre Eigenschaften, VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf, 1988

Drewitz, Y. und Schalau, B.: Erstellung quantitativer Risikoanalysen für ausgewählte sächsische Betriebe mittels einer durch die Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung entwickelten Methodik und Vergleich der Ergebnisse mit den Ergebnissen qualitativer Risikoanalysen auf Basis vorliegender Sicherheitsberichte, Schriftenreihe des Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Heft 22/2009

Dunn, V.: Beating the Backdraft, Fire Engin., New York 141(1988) 4

Dunn, V.: Flashover, Fire Engin., Tulsa 143(1990)12

Dunn, V.: The dangers of Outside Venting, Fire Engin., Tulsa 142(1989)10

Fire Protection Guide on Hazardous Materials (12th ed.), National Fire Protection Association – NFPA, Quincy, MA, 1997

Forschungszentrum Jülich Bericht 220-1902.00 10/98

Frei-Sulzer, M. und Suter, A.: Leitfaden zur Bearbeitung von Bränden und Explosionen, Kriminalistik-Verlag, Hamburg, 1971

Freitag, E.: Brandermittlung, Kriminalistik-Verlag Heidelberg, 1982

Freytag, H. H.: Handbuch der Raumexplosionen, Verlag Chemie, Weinheim 1965

Gaydon, A. G.: The Spectroscopy of Flames, Chapman and Hall, London, 1974

Grimwood, P. T.: There are differences between backdraft and flashover, Fire, Redhill 84 (1991)1038

Grumbt, A.: Gleichgewichtsgase der Verbrennung und Vergasung, Springer-Verlag Berlin-Göttingen-Heidelberg, 1958

Hähnel, E.: Lexikon Brandschutz, Staatsverlag der DDR, Berlin 1984

Hamberger, W.: Sicherheitstechnische Kennwerte, Brandschutz 45 (1991) 1

Hamberger, W.: Sicherheitstechnische Kennzahlen brennbarer Stoffe, Die Roten Hefte 5, W. Kohlhammer Verlag, 1995

Handbook of Chemistry and Physics, 74. Edition CRC Press 1993

Hauser, G.: Bauphysikalische Grundlagen – Wärmelehre, Vorlesungsskript Bauphysik I (http://www.delta-q.de/export/sites/default/de/downloads/skript_waermelehre_november2003.pdf)

Hayasaka, H., Koseki, H. und Tashiro, Y.: Radiation measurements in large-scale kerosene pool flames using high-speed thermography, Fire Technology, 1992, Volume 28, Number 2

Hennig, F. und Moser, H.: Temperaturmessung, Springer-Verlag, Berlin, 1977

http://publikationen.dguv.de/dguv/pdf/10002/bia-report_12-97.pdf

Icove, D.J. and DeHaan, J.D.: Forensic Fire Scene Reconstruction, 2nd Edition, Pearson/Prentice Hall, 2009

Jellinek, H. H. G.: Degradation and Stabilization of Polymers, Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam, 1983

Koseki, H. und Yumoto, T.: Air entrainment and thermal radiation from heptane pool fires, Fire Technology, February 1988, Vol. 24, Nr. 1

Kluge, F.: Brandobjekte und Brandursachen, Die Roten Hefte, Nr. 30 Kohlhammer-Verlag, Stuttgart, 1981

Kriminalistik Kleine Fachbuchreihe 4/3, Die Suche und Sicherung von Spuren, Teil III, Brände und Havarien, Publikationsabteilung des Ministerium des Innern der DDR, Berlin, 1974

Madorski, S. L.: Thermal degradation of organic polymers, Interscience Publishers, J. Wiley and Sons, New York, 1964

McGrattan, K. B.; Baum, H. R. and Hamins, A.: Thermal Radiation from Large Pool Fires, NISTIR 6546, National Institute of Standards and Technology, November 2000

Monachow, V. T.: Brandgefährlichkeit von Stoffen – Untersuchungsmethoden, Staatsverlag der DDR, Berlin, 1984

NFPA 921 – Guide for Fire and Explosion Investigation, National Fire Protection Association, Quincy, MA, USA, 2011

Pohl, K.-D.: Untersuchungen bei Bränden – Handbuch der naturwissenschaftlichen Kriminalistik II, Kriminalistik Verlag, Heidelberg, 1984

Polthier, K.: Lexikon Brand- und Explosionsschutz, Kohlhammer Verlag, Stuttgart, 1996

Portz, H.: Brand – und Explosionsschutz von A – Z, Begriffserläuterungen und brandschutz-technische Kennwerte, Vieweg Verlag, Wiesbaden, 2005

Prendtke, W.-D.: Lexikon der Feuerwehr, Kohlhammer Verlag, Stuttgart, 1996

Reinhardt, H. und Kirchhof, E.: Brennbare Flüssigkeiten; Staatsverlag der DDR, Berlin 1973

Römpp-Chemielexikon – 9. erw. und neubearbeitete Auflage, Georg-Thieme-Verlag Stuttgart/New, York

Scheichl, L.: Brandlehre und chemischer Brandschutz, Hüthig-Verlag Heidelberg, 1958

Stauffer, E., Dolan, J. A. and Newman, R.: Fire Debris Analysis, ACADEMIC PRESS, 2008

Steinleitner, H.-D. u. a.: Brandschutz- und sicherheitstechnische Kennwerte gefährlicher Stoffe, Verlag Harri Deutsch, Thun und Frankfurt/Main, 1989

Stöhr, G. und Bauer, G.: Flash over – Kalkuliertes Risiko, Österr. Feuerwehr, Wien (1993) 2

Tewarson, A. and Pion, R. F.: Burning intensity of commercial samples of plastics, Fire Technology, Volume 11, Number 4, 1975

Troitzsch, J.: Plastics Flammability Handbook, 3rd Edition, Hanser Publishers, Munich, 2004

VdS-Richtlinie 2516 , 2000-12 (01) Kunststoffe, Eigenschaften, Brandverhalten, Brandgefahren bzw. http://vds.de/fileadmin/vds_publicationen/vds_2516_web.pdf

Wagner, W.: Wärmeübertragung; Vogel Buchverlag, Würzburg 1989

Welker, J. R.: Ignition of combustible solids, Report 73069, University of Oklahoma, 1973

2 Maßnahmen am Brandort

2.1 Vorbereitende Maßnahmen

Die vorbereitenden Maßnahmen umfassen die Gesamtheit aller zur Erfüllung der Aufgaben eines Brandursachenermittlers benötigten Fähigkeiten und technischen Hilfsmittel sowie deren sichere Beherrschung. Dazu gehören neben einem umfangreichen theoretischen Wissen mehrjährige praxisbezogene Erfahrungen. Insbesondere sind Kenntnisse über die Kausalität, die Logik sowie die Tatsache erforderlich, dass es keinen Brandort ohne konkrete Folgeerscheinungen, Relikte und eine Vielzahl weiterer Informationen zur Brandursache gibt. Der Brandursachenermittler muss über individuelle Voraussetzungen hinsichtlich der Beherrschung von Grundkenntnissen der kriminalistischen Spurensuche und Spurensicherung sowie der Methodik der Brandortuntersuchung verfügen. Nahezu unerlässlich sind eine grundlegende naturwissenschaftlich-technische Ausbildung sowie umfassende Kenntnisse der entsprechenden straf- und zivilrechtlichen sowie straf- und zivilprozessualen Anforderungen.

Vorbereitende Maßnahmen beziehen sich auch auf das Bereithalten einer zweckentsprechenden technischen Ausrüstung, die in vollem Umfang einsatzbereit zur Verfügung stehen muss. Die zur Arbeit am Brandobjekt geeignete Ausrüstung verändert sich im Laufe der Jahre ständig. Eine Schaufel, ein Besen und ein Sieb sind aber immer noch wichtige Arbeitsgeräte. Ergänzt wird die Ausstattung durch technische Messgeräte, wie z. B. einen Photoionisationsdetektor (siehe Abschnitt 2.5.2), zweckentsprechendes Werkzeug und insbesondere eine dem Arbeitsschutz Rechnung tragende Schutzausrüstung. Für eine ordnungsgemäße Spurensicherung und den Transport von Brandschuttproben müssen ausschließlich geeignete Verpackungsmaterialien verwendet werden. Grundvoraussetzung für eine lückenlose und gerichtsverwertbare Dokumentation des Brandortes sind eine zweckmäßige Ausrüstung sowie das notwendige Zubehör.

Mag die vorhandene technische Ausrüstung noch so individuell oder in Abhängigkeit einer Verwaltungsvorschrift bzw. aus Gründen einer Haushaltsbeschränkung zusammengestellt werden, ein gewisses Minimum an technischer Ausstattung muss verfügbar sein, denn ohne sie ist eine qualifizierte Brandortarbeit nicht erfolgreich.

2.2 Sofortmaßnahmen

Erfahrungsgemäß herrscht bei Ausbruch eines Brandes, insbesondere bei Bränden von größeren Gebäuden, ausgedehnten baulichen Objekten oder Industrieanlagen, immer große Aufregung, Hektik und unorganisiertes Handeln. So werden z. B. während der Evakuierung des Brandobjektes oder im Rahmen der Löschmaßnahmen häufig Veränderungen des Ereignisortes vorgenommen, die zum Teil unbewusst geschehen und an die sich die Beteiligten deshalb später nicht mehr erinnern können. Die zum Zeitpunkt des Brandes herrschenden meteorologischen Bedingungen (Niederschlag, Sturm, Gewitter, Frost) können im direkten Zusammenhang mit dem Brand stehen bzw. sich auf die Verursachung des Brandes, den Brandverlauf und den Löscheinsatz auswirken.

Um eine der kriminalistischen Beweisführung dienende Spurensuche und Spurensicherung vornehmen zu können, ist es unabdingbar, dass als eine der ersten Maßnahmen der Brandort mit allen seinen Nebenbereichen vor dem Zugriff und der Inaugenscheinnahme durch Unbefugte großräumig abgesperrt wird. Die Absperrung und gegebenenfalls Beschlagnahme haben unter Beachtung der Strafprozessordnung so zu erfolgen, dass Veränderungen innerhalb und außerhalb des Einsatzortes durch Unbefugte und Schaulustige verhindert werden. Mögliche Spuren des Verursachers dürfen auch im weiteren Umkreis des Brandobjektes nicht verändert, beeinträchtigt oder gar vernichtet werden. Neben der genauen Eingrenzung des abgesperrten Bereiches sind die Zutrittsmöglichkeiten für alle Einsatzkräfte und andere Personen eindeutig und unmissverständlich festzulegen.

Erfahrungsgemäß werden bereits durch den Einsatzleiter der Feuerwehr zur Gefahrenabwehr und -beseitigung am Ereignisort erste Absperr- und Sicherungsmaßnahmen veranlasst. Durch eine zeitnahe und kompetenz-unabhängige Zusammenarbeit mit dem Einsatzleiter der Feuerwehr sind diese Maßnahmen bezüglich der notwendigen kriminalistischen Untersuchungen am Ereignisort zu überprüfen und gegebenenfalls für eine tatortrelevante Sicherstellung und Beschlagnahme zu ergänzen. Die Festlegung des abzusperrenden Abschnittes ist abhängig von der örtliche Lage, der Größe und dem Zustand des Ereignisortes, der Möglichkeit einer Brandausbreitung, der Gefahr einer Folgeexplosion oder des möglichen Einsturzes der Baukonstruktion.

Art und Umfang der Absperrung können sich bei einem brandbeschädigten Produktionsraum, einem Industriebetrieb und einem Gebäude grundlegend unterscheiden. Die Kennzeichnung des abgesperrten Bereiches darf sich nicht nur auf das Anbringen von Absperrbändern oder Ähnlichem beschränken. Vielmehr müssen Sicherungskräfte bzw. Absperrposten eingeteilt werden. Sie sind in ihre Aufgabe einzuweisen und über mögliche Gefahren in Kenntnis zu setzen. Alle Einsatzkräfte müssen zudem auf Personen achten, die sich durch ihre Handlungsweise, durch Bemerkungen oder Fragen auffällig verhalten. Die Personalien dieser Personen sind zu ermitteln. Weiterhin ist auf Personen zu achten, die sich als Zeugen zu erkennen geben, aus deren Gesprächen oder Bemerkungen zu entnehmen ist, dass sie Angaben über die Brandentstehung, den Brandverlauf, Anomalien bzw. über verdächtige Personen machen können.

Nachdem der Ereignisort entsprechend den relevanten Erfordernissen abgesperrt bzw. beschlagnahmt wurde, muss noch vor dem Beginn der eigentlichen Untersuchungen zur Brandursache eine genaue Beurteilung der Ausgangslage durchgeführt werden. Auf dieser Basis kann der Brandursachenermittler in kürzester Zeit erste Informationen über die Geschehnisse am Brandobjekt erlangen und daraus resultierende Maßnahmen und Untersuchungshandlungen einleiten. Es ist zu beachten, dass sich die Brauchbarkeit der ermittelten Erstinformationen nachhaltig auf die Untersuchungen auswirkt.

Die auf der Grundlage von Erstinformationen durchgeführten Handlungen dürfen sich in ihrer Effektivität nicht auf den Beginn der Untersuchungen beschränken, sondern müssen sich auf den gesamten Arbeitsprozess erstrecken. Bei einer Fehlentscheidung, bedingt durch unzureichende und fehlerhafte Informationen, können nicht wieder gutzumachende Folgen eintreten. Nur durch eine konsequente Erfassung der Erstinformationen ist eine rationelle und in allen Phasen der Untersuchung beweisichere Aufklärung

der Brandursache gegeben. Mit dem Eintreffen am Einsatzort muss der gesamte Tätigkeitsablauf hinsichtlich der Bedingungen von Ort, Zeit und Umständen präzise protokolliert werden.

Zur Erfassung sämtlicher allgemeiner Daten werden oftmals Checklisten verwendet. Die Anwendung von Checklisten kann eine chronologische Ereignisortarbeit erleichtern und hilft Datendefizite zu verhindern. Nachteilig sind Checklisten, wenn sie als eine Art unkritische Gebrauchsanleitung angesehen werden, die Besonderheiten des zu bearbeitenden Brandfalles außer Acht lassen und außerdem eine Prüfung auf Widerspruchsfreiheit unterlassen wird. Eine Checkliste soll also als Anregung verstanden werden, den Fragenkatalog den besonderen Umständen anzupassen.

Zur Erfassung der wichtigsten Erstinformationen gehört, ohne hierfür eine Reihenfolge festlegen zu wollen, die Beantwortung der nachfolgend aufgeführten Fragen bzw. die Beachtung folgender Aspekte:

- Durch wen und wann erfolgte die Auftragserteilung?
- Wann wurde der Einsatzort erreicht (Zeitpunkt)?
- Wer hat die Einsatzleitung (Feuerwehr, Polizei, Namen)?
- Welche Einsatzkräfte sind bereits vor Ort?
- Welche Kräfte und Mittel stehen zur Verfügung bzw. werden benötigt?
- Wie erfolgt die Koordinierung der notwendigen Kräfte?
- Wer traf bzw. trifft wann ein?
- Was wurde bereits veranlasst und wer wurde verständigt?
- Wurden Personen (Tote, Verletzte, Zeugen) vom Einsatzort entfernt?
- Welchen Umfang und welche Bedeutung hat das Brandobjekt?
- Wie ist das Brandobjekt hinsichtlich der Größe, der Nutzung und der vorhandenen Technik einzuschätzen?
- Entgegennahme des Sachstandsberichtes vom Einsatzleiter der Feuerwehr bzw. des an der Brandstelle tätigen Verantwortungsträgers (Schutzpolizei)
- Verbindungsaufnahme mit dem Geschädigten oder einem anderen Verantwortlichen
- Abstimmung über das Vorgehen am Brandobjekt
- Allgemeine informatorische Besichtigung des Brandobjektes und dessen näherer Umgebung
- Anpassung der Maßnahmen im Zusammenhang mit der Sicherung des Brandobjektes
- Dokumentation der Brandentwicklung
- Prüfung des Einsatzes von Sachverständigen und anderen Spezialisten

- Bereitstellung von Arbeitsräumen für die Untersucher

Diese Anforderungsliste kann nicht vollständig sein, sie ist fallweise zu modifizieren bzw. zu ergänzen.

2.3 Erfassung örtlicher, zeitlicher und personeller Zusammenhänge

2.3.1 Brandentdeckung, Brandmeldung

Bereits mit der Entdeckung eines Brandes und der Brandmeldung ist ein unaufschiebbarer und umfassender Informationsbedarf vorhanden, der zur Klärung der Brandursache und – soweit eine strafbare Handlung vorliegt – auch zur Ermittlung und Überführung des mutmaßlichen Täters erforderlich ist. Die Beantwortung der sich daraus ergebenden Fragen ist häufig mit der Einleitung weiterer zwingend notwendiger Untersuchungshandlungen verbunden. Unabhängig von der Art und der Größe des Brandobjektes sowie der strafrechtlichen Relevanz der Brandursache sind die Angaben der Person oder der Personen von großer Bedeutung, die den Brand bemerkt haben.

Der oder die Brandentdecker können als Erstzeugen

- Unbeteiligte
- Geschädigte oder
- Brandverursacher

sein.

Neben einer so genau wie möglich einzugrenzenden Zeitangabe, die sich auf den Ort der Brandwahrnehmung und das Eintreffen am Brandobjekt bezieht, ist festzustellen, ob die mitteilende Person den Brand selbst bemerkt hat und welche konkreten Erscheinungen am Ereignisort und im erweiterten Umfeld beobachtet wurden. Angaben von Erstzeugen zu ihrem Standort, ihren Bewegungsabläufen sowie deren Blickrichtung sind gegebenenfalls durch eine Rekonstruktion zu überprüfen. Die nachfolgenden Handlungen des Brandentdeckers sind chronologisch zu erfassen. Hierzu zählen z. B. die Alarmierung der Feuerwehr, des Rettungsdienstes oder der Polizei sowie eigene Lösch- und Bergungsmaßnahmen.

Ferner ist zu prüfen, ob der Brandentdecker andere Institutionen oder Personen, wie Wachdienst, Pförtner oder Hausmeister, vom Brandereignis in Kenntnis gesetzt hat. Weiterhin kann der Brandentdecker Beobachtungen bezüglich anderer Personen oder zu Fahrzeugen auf dem Weg zum Brandobjekt gemacht haben. Hierzu sind Angaben zu Ort und Zeit notwendig.

Hält sich der Brandentdecker am Ereignisort auf, sind die zu diesem Zeitpunkt beobachteten Erscheinungen wie Ausdehnung des Brandes, die weitere Brandentwicklung sowie

besondere Erscheinungsformen wie Flammenfarbe, Flammenhöhe und Ausbreitung des Brandrauches zu erfragen.

Die am Brandobjekt vorhandenen Zugangsmöglichkeiten (Türen, Fenster, Tore), der Verschluss- und Beleuchtungszustand und in Betrieb befindliche Anlagen liefern weitere Erkenntnisse.

Der Brandentdecker kann außerdem erste Löschversuche und/oder Bergungsmaßnahmen durchgeführt sowie Veränderungen vorgenommen haben.

Diese subjektiven Angaben müssen einer gründlichen Überprüfung hinsichtlich des objektiven Sachverhalts unterzogen werden. Eine Bestätigung und letztlich Überprüfung der Angaben des Brandentdeckers kann auch durch übereinstimmende Beobachtungen mehrerer Zeugen erfolgen.

2.3.2 Alarmierung, Brandbekämpfung, Brandverlauf

Mit der Alarmierung der Feuerwehr werden erste Angaben, die für die Untersuchung der Brandursache erforderlich sein können, bei der Leitstelle aufgezeichnet. Die jeweils zuständigen Rettungs-, Feuerwehr- und Polizeileitstellen (Integrierte Leitstellen) haben nicht nur für den Ablauf und die Reihenfolge der Alarmierungen die Verantwortung, sie registrieren auch die Notrufmeldungen und führen den Funkverkehr zwischen der Leitstelle und den Einsatzfahrzeugen. Das heißt, dass bereits mit der Meldung des Brandes z. B. neben den Grundinformationen zum Ereignis (Größe, Ort, Zeit usw.) erste Angaben zur meldenden Person, möglichenfalls zu ihrer physischen und psychischen Verfassung sowie den zu diesem Zeitpunkt herrschenden örtlichen Gegebenheiten bekannt werden.

Weiterhin ergeben die Status- und Lagemeldungen im Funkverkehr verlässliche Zeitangaben zum Einsatzablauf der Feuerwehren. Die Einsatzberichte bzw. die Audioaufzeichnungen können hierzu von der Leitstelle angefordert werden.

Diese Angaben besitzen für die Analyse der örtlichen, zeitlichen und personellen Zusammenhänge am Brandort eine nicht zu unterschätzende Bedeutung.

Unmittelbar nachdem die Feuerwehr am Ereignisort eingetroffen ist, werden von den Einsatzkräften erste Maßnahmen der Menschenrettung, der Brandbekämpfung bzw. zur Gefahrenabwehr eingeleitet.

Der Einsatzleiter der zuerst am Ereignisort eintreffenden Feuerwehr bildet mit der dazugehörigen Fahrzeugbesatzung den Personenkreis, der über diese ersten Maßnahmen verwertbare Auskünfte geben kann. Dabei sind nicht nur Fragen zum Ausmaß des Brandes, der Flammen- und Rauchgasausbreitung relevant. Vielmehr sollte auch nach den Bereichen gefragt werden, wo es im Anfangsstadium noch nicht gebrannt hat und ob bereits beim Eintreffen der Feuerwehr Teile des Bauwerkes durchgebrannt, eingefallen oder zerstört waren. Darüber hinaus können die Einsatzkräfte der Feuerwehr sachdienliche Hinweise zu relevanten Nebenaspekten (z. B. Schließzustand, Betriebszustände, Leichenfund) geben.

Die Feuerwehren handeln bei einem Brandereignis immer nach dem Grundsatz „Menschenrettung geht vor Brandbekämpfung“. Daraus folgt, dass bei einer Gefährdung von Personen zuerst Maßnahmen zu deren Rettung eingeleitet werden, wobei Veränderungen in der Spurenlage unvermeidlich sind. Neben den zeitlichen Angaben dieser Handlungen ist weiterhin festzustellen, wo sich Personen bei ihrer Rettung befunden haben. Wurden Personen verletzt oder getötet, ist zu klären, wann, durch wen und vor allem wohin der Abtransport erfolgte.

Unabhängig von der Größe und der Ausdehnung des Brandes ist der gesamte Ablauf der Brandbekämpfung einschließlich der dabei veranlassten Veränderungen zu erfassen. Dabei sind die Daten zum Löschangriff, zur Art und Anzahl der Strahlrohre, sowie die Beschreibung der Brandabschnitte von Bedeutung. Bei Bränden größeren Ausmaßes kann u. U. ein umfassender Löschangriff aus einsatztaktischen Gründen nicht erfolgen, was im Nachgang wegen der Verfälschung des Spurenbildes die Feststellung der Brandausbruchsstelle erschwert. Grundsätzlich muss sich aber der Löschangriff auf bestimmte Abschnitte, die beispielsweise eine besondere Gefährdung oder einen sehr hohen materiellen/ideellen Wert besitzen, konzentrieren. Auch kann nicht ausgeschlossen werden, dass der eigentliche Brand sofort bekämpft wird, weil – bezogen auf den Ereignisort – eine weitere Brandausbreitung auf angrenzende Objekte oder Gebäude verhindert werden muss. Für die Analyse der Brandbekämpfung ist zu berücksichtigen, welches Löschmittel an welcher Stelle und wie lange eingesetzt wurde.

Die Angehörigen der Feuerwehr gebrauchen in der Beschreibung des Brandverlaufes oftmals feuerwehrspezifische Begriffe oder Fachausdrücke, die in der einschlägigen Fachliteratur einen abweichenden Sinngehalt aufweisen (z. B. Flashover, Backdraft, siehe Glossar). Deshalb muss gezielt nach dem wahrgenommenen Brandverlauf und den Branderscheinungen gefragt werden.

Im Verlauf der Brandbekämpfung wird die Feuerwehr in der Regel unerlässliche Handlungen durchführen. Zusätzlich zu den vom Brand verursachten Schäden werden zwangsläufig weitere Veränderungen am Ereignisort notwendig (wie bereits beschrieben). Dazu gehört unter anderem auch, dass ein oder mehrere Zugänge zum Objekt geschaffen werden. Die Einsatzkräfte sind über verschlossene, blockierte, aufgebrochene oder offene Zugänge und Fenster zu befragen. Bei Vorhandensein von Anlagen der Energieversorgung sind Informationen zu deren Schalt- und Betriebszustand bzw. zu den durch die Feuerwehr herausgedrehten bzw. abgeschalteten Überstromschutzorgane (z. B. Sicherungen, Leitungsschutzschalter, Fehlerstromschutzschalter) einzuholen. Bei Gasanlagen sind alle Schalt- und Sicherungsmaßnahmen festzuhalten. Weiterhin ist festzustellen, wann und in welchem Umfang eine Bergung von Sachwerten und welche weiteren Maßnahmen zur Gefahrenabwehr erfolgten.

2.3.3 Zeugenangaben

Die am Ereignisort anwesenden Personen beobachten in irgendeiner Form den Ablauf des Brandes. Auch wenn diese Feststellungen personenspezifische Wahrnehmungen sind, können die Angaben bei vergleichender Betrachtung wesentliche Hinweise zum Verlauf und zur Ausbreitung des Brandes enthalten. Dies gilt unabhängig von der Tatsache, dass die Angaben widersprüchlich sein können. In der Anfangsphase des Brandes ist das Augenmerk vor allem auf die Personen zu richten, die sich an der Brandstelle aufhalten bzw. aufhielten.

Durch eine systematische Befragung von Personen in der näheren Umgebung des Ereignisortes, lassen sich in der Regel diese Zeugen ermitteln.

Bei deren Einzelbefragung ist von Bedeutung, wie der Zeuge überhaupt auf den Brand aufmerksam wurde, wo er sich während des Brandes aufgehalten und bewegt hat, was er konkret gesehen hat und welche Handlungen er anschließend ausführte. Dazu gehören Angaben über seinen Standort, seine Blickrichtung und seit wann er das Brandobjekt eingesehen hat. Wesentlich sind dabei Aussagen über die Farbe, Intensität und Größe der Flammen sowie das Ausmaß und die Intensität der Rauchentwicklung. Besonderheiten oder auffälliger Geräusche und Gerüche sind zu berücksichtigen. Der Standort des Zeugen ist vom Brandermittler aufzusuchen und bezüglich des Brandobjektes zu dokumentieren.

Nach Bemerkung des Brandes werden oftmals erste Maßnahmen zur Rettung von Verletzten bzw. gefährdeten Personen sowie zur Brandbekämpfung eingeleitet. Hierbei können Zerstörungen an Türen, Fenster oder anderen Baukonstruktionsteilen bemerkt werden. Diese Wahrnehmungen sind im Rahmen der Zeugenbefragungen bzw. -vernehmungen festzuhalten und mit Orts- und Zeitangabe in die Brandortskizze einzutragen bzw. durch die Zeugen in einer eigenen, unbeeinflussten Skizze darzustellen. Abschließend ist zu prüfen, über welche Orts- und Detailkenntnisse der Zeuge zum Brandobjekt verfügt.

Neben den Angaben zum Verlauf des Brandes sind die Feststellungen zur Personenbewegung im und am Brandobjekt abzufragen. Folgende ergänzende Fragestellungen sollten typischerweise berücksichtigt werden:

- Wann und wo hat der Zeuge eine Person oder eine Personengruppe beobachtet?
- Können Angaben zur Personenbeschreibung bzw. zur Bekleidung gemacht werden?
- Welchen Weg haben diese Personen bzw. Personengruppen zurückgelegt?
- Welche Gegenstände führte die Person mit sich?
- Welche Personen sind am Ereignisort eingetroffen und mit wem hat der Zeuge gesprochen?
- Welche Fahrzeuge befanden sich an der Brandstelle?

- Welche spezifischen Kenntnisse liegen vor?
- Über welche Ausbildung verfügt der Zeuge (Beruf, Tätigkeiten)?
- Liegen spezielle Fachkenntnisse vor (z. B. Elektrofachkraft, Schornsteinfeger, Feuerwehrangehöriger)?

Bei Zeugen mit eingeschränkten Sprachkenntnissen, insbesondere bei Ausländern, ist zur Vermeidung von Übersetzungsirrtümern grundsätzlich ein Dolmetscher hinzuzuziehen.

2.3.4 Angaben von Geschädigten

Geschädigte, z. B. ein Hauseigentümer, ein Firmeninhaber oder ein Verantwortlicher, müssen unter Beachtung der Anforderungen der Prozessordnungen (StPO, ZPO) befragt werden. Zu beachten ist immer, dass ein Geschädigter, ein Firmenangehöriger bzw. ein Firmeninhaber den Brand fahrlässig oder vorsätzlich verursacht haben kann, d. h. deren Aussagen sind gewissenhaft zu überprüfen.

Die detaillierte Beschreibung des Ereignisortes ist in Form einer Befragung oder späteren Zeugenvernehmung festzuhalten und durch die Anfertigung eigener Skizzen zur Gebäudekonstruktion sowie zur Einrichtung zu ergänzen. Im Rahmen der weiteren Untersuchungen müssen diese Angaben anhand der objektiven Gegebenheiten überprüft werden. Festgestellte Widersprüche, z. B. zur Anzahl oder zur Qualität von wertintensiven Anlagenteilen, Geräten und Lagergütern sind durch einen Soll-Ist-Vergleich zu objektivieren. Erforderlichenfalls muss der Brandschutt nach den entsprechenden Resten abgesucht werden.

Es ist festzustellen, welche Mitarbeiter Zugang zu den Firmenräumen hatten und wie die Schlüsselvergabe organisiert war. Hierzu sind die Anwesenheitsnachweise der Firmenmitarbeiter, die Schichtbesetzung sowie die Arbeitsnachweise von Betriebshandwerkern und Fremdfirmen zu überprüfen. Zeiterfassungssysteme können hier zur Überprüfung der Angaben herangezogen werden.

Durch diese Personen ist beispielsweise eine Unterstützung der Brandortuntersuchung hinsichtlich der Kenntnis über die Örtlichkeiten der vom Brand betroffenen Anlage, die Art und der Umfang der Produktion sowie des technischen Prozesses möglich. Weiterhin kann eine zeitliche Einschätzung hinsichtlich eines Produktionsausfalles, eventueller finanzieller Verluste oder weiterer Schäden abgegeben werden.

Unter Berücksichtigung der Eigeninteressen des Firmeninhabers bezüglich einer Wiederinbetriebnahme oder einer Beräumung sind seine Aussagen kritisch zu prüfen, um eine abschnittsweise Freigabe des Brandobjektes zu ermöglichen.

Wird seitens der geschädigten Firma angestrebt, eigene Untersuchungen auch unter Einbeziehung der Versicherungen und deren Sachverständigen vorzunehmen, sind die strafrechtlichen Maßnahmen vorrangig zu beachten. Bei zivilrechtlichem Hintergrund sind die Vorgehensweisen zwischen den Beteiligten (Geschädigte, Rechtsanwälte, Gerichte, Versicherungen) abzusprechen.

2.4 Besichtigung des Brandobjektes und Dokumentation der Spuren

2.4.1 Brandobjekt

In der Mehrzahl aller Brandfälle bleibt das Schadenfeuer auf ein Objekt begrenzt, wie z. B. einen Raum, eine Wohnung oder einen Objektflügel, so dass der Brandausgangsbereich eingengt ist. Wurden allerdings mehrere Objekte vom Brand erfasst, sollte zunächst geklärt werden, von welchem Objekt der Brand ausging oder ob voneinander unabhängige Brandentstehungsorte vorliegen.

Unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Brandschäden, der Art, Menge und der Verteilung der brennbaren Stoffe, der vorhandenen Gebäudeabstände und der meteorologischen Bedingungen lassen sich aussagefähige Anhaltspunkte zur Feststellung des Brandentstehungsbereiches erarbeiten. Insbesondere sind folgende Fragen zu beantworten:

- Besteht die Baukonstruktion aus brennbaren oder nicht brennbaren Bauteilen?
- Sind in den Wänden Öffnungen, wie Fenster, Türen oder Durchbrüche, vorhanden, über die eine Brandübertragung in angrenzende Gebäudeabschnitte erfolgen konnte?
- Welche Gegenstände und Materialien sind im Brandobjekt vorhanden und wie sind diese verteilt?

Hinsichtlich einer möglichen Brandübertragung durch Wärmestrahlung, heiße Rauchgase oder durch im Rauchgasstrom mitgeführte brennende Teile sind die Lage der Gebäude bzw. die Gebäudeabschnitte zueinander sowie die Gebäudehöhe zu erfassen.

Bei den Untersuchungen von Elektroanlagen ist zu rekonstruieren, wie der Verlauf der Zuleitungen zu den einzelnen Gebäuden war und wo sich Haupt- und Unterverteilungen befanden. Unter Berücksichtigung der eventuell in der Anfangsphase durchgeführten Schalthandlungen kann durch die Feststellung des Betriebszustandes der einzelnen Überstromschutzorgane in den Elektroverteilungen der vom Brand zuerst betroffene Objektabschnitt eingegrenzt werden. Die Befunde sind in nachvollziehbarer Form zu dokumentieren.

Bei der Begehung des Brandobjektes ist auf den Verlauf von Versorgungsleitungen der Gebäudetechnik, auf Fördereinrichtungen, Kabel, Leitungen und Armaturen elektrischer Signalanlagen, Uhren, Brand- und Einbruchsmeldeanlagen oder Steueranlagen zu achten. Zu kontrollieren sind neben der elektrischen Installation auch angeschlossene elektrische Verbraucher, auch wenn sich diese nicht in dem vom Brand betroffenen Bereich befinden. So können Ausfälle von Betriebsmitteln oder Steuerstromkreisen vor dem Bemerkens des Brandes einen zeitlichen Hinweis auf die Schädigung der Installation durch die Brandeinwirkung und auf die Brandursache liefern.

Nach der Besichtigung des Brandobjektes können noch weitere Untersuchungen erforderlich werden, so dass z. B. ausgewählte Bereiche entlang von Trennwänden beräumt

oder der Fußboden in verschiedenen Räumen auf Einbrennspuren freigelegt werden müssen. Ebenfalls sind die Art und Höhe des Rauchgasniederschlages in verschiedenen Räumen zu ermitteln. An Bauteilen aus Holz kann es erforderlich sein, die Tiefe der Einbrennspuren (Brandnarben) zu vermessen, um die Richtung bzw. die Dauer der Brandeinwirkung zu rekonstruieren. Die erhobenen Befunde sind zu dokumentieren und gegebenenfalls im Original zu sichern.

Nach dem Abschluss dieser Untersuchungen sind die bisherigen Befunde zu ordnen, miteinander zu vergleichen, auf Widerspruchsfreiheit zu prüfen und in ihrer Gesamtheit sowie ihren Wechselbeziehungen durch den Sachverständigen zu bewerten. Ziel ist es, anhand der gesicherten Brandspuren den ursprünglichen Zustand, den Brandverlauf, die Phasen des Brandes zu rekonstruieren und somit den primären Brandraum bzw. den Brandausbruchsbereich einzugrenzen.

Die Umstände und Bedingungen, die Einfluss auf den Brandverlauf und die Brandausbreitung haben, müssen nach deren Einflussfaktoren, wie:

- bauliche Charakteristika
- Wärmeübertragungsmöglichkeiten,
- Brandlastverteilung (siehe Glossar)
- Lüftungsbedingungen
- Zeitpunkt der ersten Löschmaßnahmen
- Ort der ersten Löschmaßnahmen
- Dauer der Löschmaßnahmen

erfasst und in der Bewertung berücksichtigt werden.

Es ist außerdem darzulegen, warum an bestimmten Stellen im Brandobjekt der Brand sich nicht weiter ausgebreitet hat. Ursache dafür können unter anderem sein, dass keine weiteren brennbaren Materialien mehr vorhanden waren, ein Sauerstoffmangel eintrat, Elemente des baulichen Brandschutzes wirksam wurden, die Wirkung des Löschangriffes der Feuerwehr oder automatischer Löschanlagen eintrat oder dass Gebäudeteile einstürzten.

2.4.2 Brandraum

Im Brandraum werden alle Wirkungen des Brandes, die ohne weiteres wahrnehmbar sind, erfasst und dokumentiert. Angefertigte Skizzen müssen im Verlauf der Untersuchungen aktualisiert werden. Insbesondere sind Öffnungen in der Baukonstruktion sowie die Raumaufteilung des Objektes zu erfassen.

Bei der Untersuchung sind alle Räume des Brandobjektes zu begehen. Spuren können dabei beispielsweise in Form von Rauchgasniederschlägen über Öffnungen, unterschiedliche Ein- und Verbrennungen an Fenstern und Türen, dem Grad der Ein- und

Verbrennungen, Deformierungen an haustechnischen Anlagen, Rauch- und Wärmeabzugsanlagen, Klimaanlage, Absauganlagen u. ä. unterschieden werden.

Eindeutige Brandspuren, die eine zweifelsfreie Ermittlung des Brandraumes ermöglichen, sind beispielsweise:

- Putzabplatzungen
- Glasteile von Fensterscheiben unterschiedlicher Berußung und unberußte Flächen
- trichterförmiger Brand- und Rauchspuren
- Durchbrennungen im Trauf- und Dachbereich, an Decken, Fußboden, Wänden und anderen Bauteilen
- deformierte Bauteile und Geräte
- deformierte Stahlkonstruktionen
- umgestürzte Bauteile
- Neigungswinkel an deformierten Gegenständen
- Teileinstürze

2.4.3 Dokumentation des Brandortes

2.4.3.1 Aufnahmen während des Brandes

Beim Eintreffen am brennenden Objekt ist der weitere Brandverlauf fotografisch und nach Möglichkeit mittels Videotechnik zu dokumentieren. Dabei ist von rekonstruierbaren Standorten in regelmäßigen, protokollierten Zeitabständen aufzunehmen. Um Aufnahmeserien zum Brandverlauf vergleichen und die Branddynamik dokumentieren zu können, ist bei Kameras mit Zeiteinblendung oder -registrierung auf die Echtzeiteinstellung zu achten.

Unabhängig davon, ob durch die Feuerwehr oder die Polizei Aufnahmen gefertigt wurden, ist immer nach anderen Personen zu suchen, die während des Brandes fotografiert oder beispielsweise mit einem Handy gefilmt haben. Aus dem Bildmaterial, sowohl unbeteiligter Bürger als auch z. B. von Pressefotografen, können wichtige Anhaltspunkte zum Brandverlauf oder auch zum Bereich des Brandausbruches gewonnen werden.

Orientierungsaufnahmen dokumentieren das Brandobjekt in seiner Gesamtheit und seiner Lage zur angrenzenden Umgebung. Als besonders aussagefähig haben sich dabei Panoramaaufnahmen erwiesen, die entweder mit speziellen Kameras oder durch das Zusammensetzen von Einzelaufnahmen hergestellt werden können.

Für die Anfertigung der Orientierungsaufnahmen sollte nach Möglichkeit ein erhöhter Standort, der einen besonders guten Überblick gestattet, gesucht werden. Steht kein erhöhter Aufnahmeort zur Verfügung, wie z. B. Fenster in höheren Etagen von Gebäu-

den, Dächern, Industrieschornsteinen o. ä., kann auch eine Drehleiter der Feuerwehr gute Dienste leisten. Diese hat zudem den Vorteil, dass sie entsprechend den Wünschen des Fotografen platziert werden kann. Nötigenfalls sind z. B. bei räumlich ausgedehnten Bränden mit unübersichtlichen Örtlichkeiten Luftbildaufnahmen erforderlich. Die hierfür erforderlichen Maßnahmen sind umgehend zu organisieren.

Übersichtsaufnahmen dienen dazu, Art, Umfang und Lage der Zerstörungen und Schäden am betroffenen Objekt in zusammenhängender Form zu dokumentieren. Aus der Reihenfolge der Bilder sollte beispielsweise der Brandverlauf oder die Wirkung einer Druckwelle ersichtlich werden. Bei Orthogonalaufnahmen können Maße direkt abgenommen werden, wenn Vergleichsgrößen bekannt sind oder hierzu ermittelt werden. Gegebenenfalls sind Methoden der Photogrammetrie anzuwenden. Übersichtsaufnahmen von vergleichbaren unzerstörten Bereichen, Räumen oder Gegenständen können technische Zusammenhänge oder Prozesse verdeutlichen.

Teilübersichtsaufnahmen haben zum Ziel, den Zustand bestimmter Bereiche zu dokumentieren, um eine nachvollziehbare Verbindung zu den Detailaufnahmen herzustellen. Damit wird der Zusammenhang zwischen brandtypischen und nicht brandtypischen Spuren in ihrer Lage zur Umgebung hergestellt. Grundsätzlich werden die entsprechenden Bereiche vor der Untersuchung, also im vorgefundenen, unveränderten Zustand dokumentiert. Nach der Kennzeichnung von relevanten Spuren wird dieser Bereich nochmals fotografiert.

Die an einem Brandort unter Umständen vorhandenen extrem schlechten Lichtverhältnisse, die Beleuchtung mit Kunstlicht oder das durch Öffnungen im Brandraum verursachte Gegenlicht bedingen die Notwendigkeit, dass besonders bei Übersichts- und Teilübersichtsaufnahmen die fototechnischen Möglichkeiten voll ausgeschöpft werden.

2.4.3.2 Fotografische Erfassung des gesamten Brandobjektes

Das Fotografieren am erkalteten Brandort hat das Ziel, die vorgefundene Situation objektiv und eindeutig sowie nachvollziehbar zu dokumentieren. Die gefertigten Bilder sind Beweismittel zum Umfang der Schäden, zum Brandverlauf, zur Brandursache sowie zum Handeln des Täters. Grundsätzlich gilt, dass durch die bildliche Erfassung des Brandobjektes eine Dokumentation der vorgefundenen Ereignisortsituation und der Spuren erfolgt. Sie kann auch nachvollziehbar den gewählten Untersuchungsablauf am Brandobjekt sowie mögliche Schlussfolgerungen hinsichtlich des Ermittlungsweges zur Brandursache widerspiegeln.

Die Dokumentation setzt die sachgemäße Anwendung der entsprechenden Technik voraus. Die Vielzahl der zur Verfügung stehenden Geräte sowie deren ständiger Weiterentwicklung erschwert eine Empfehlung für eine bestimmte Aufnahmetechnik.

Für die Anfertigung von Fotoaufnahmen konnten jedoch die besten Ergebnisse mit hochauflösenden digitalen Spiegelreflexkameras, die über verschiedene Wechselobjektive verfügen, erreicht werden. In besonderen Fällen sind Laserscanner einzusetzen.

Ein robustes Stativ sowie eine für schlechte Lichtverhältnisse notwendige Beleuchtung sind für beweissichere Aufnahmen zwingend notwendige Ausrüstungsbestandteile. Bei künstlicher Beleuchtung ist deren farbverfälschende Wirkung hinsichtlich der eigentlichen Farbtemperatur zu berücksichtigen. Außerdem können irreführende Schattenbildungen und lokale Aufhellungen auftreten.

In den vergangenen Jahren haben Wärmebildkameras (Infrarotkameras) insbesondere in den Reihen der Feuerwehr eine breite Anwendung gefunden. So werden beispielsweise Wärmebildkameras zur Suche von Personen oder zum Aufspüren von versteckten Brandherden (z. B. Glutnestern) verwendet. Auch für die Erfassung und Dokumentation des Brandobjektes kann die bildliche Darstellung mittels einer Wärmebildkamera insbesondere hinsichtlich des Brandverlaufes eine wichtige Ergänzung darstellen. Weitere Anwendungsmöglichkeiten sind denkbar und sollten für den Einzelfall geprüft werden.

2.4.3.3 Fotografische Erfassung von Details

Detailaufnahmen dokumentieren Form, Größe und Beschaffenheit von brandtypischen Spuren, wie Rauchgasniederschlag, Abbranderscheinungen, Schichtungen im Brandschutt, Glutkessel und Brandkanäle, Anlassfarben, Fehlerstromspuren u. a. Im Zusammenhang mit technischen Prozessen sind Schnitte, Risse, Brüche, Schleifspuren sowie Spuren von Explosionswirkungen zu dokumentieren.

Die Aufnahme erfolgt im Regelfall unter Zuhilfenahme eines Stativs, wobei neben der eindeutigen Kennzeichnung (z. B. Nummerntafel) ein geeigneter Maßstab in die Ebene der Spur angelegt und mitfotografiert wird. Grundsätzlich gilt, dass das zu fotografierende Objekt bzw. die Spur, insbesondere bei Digitalaufnahmen, formatfüllend aufzunehmen ist. Weiterhin müssen bei Bränden auch die sogenannten nicht brandtypischen und täterbezogenen Spuren, wie z. B. daktyloskopische Spuren, Werkzeug- oder Faserspuren fotografisch gesichert werden.

2.4.3.4 Videoaufnahmen

Die Videotechnik kann die Standbildfotografie sehr effektiv ergänzen. Bei ausgedehnten und unübersichtlichen Brandorten bringt ein fachgerecht ausgeführter Schwenk mit der Videokamera ein schnelles Verständnis für ereignisortbezogene Zusammenhänge. Daraus kann mit Hilfe fototechnischer Mittel eine Folge von Einzelbildern gewonnen werden, die aber die vorgenannten Fotoaufnahmen (siehe Abschnitt 2.4.3.1 bis 2.4.3.3) nicht ersetzen können.

Weiterhin besteht die Möglichkeit, den Verlauf der Brandortarbeit festzuhalten. Das heißt, es entsteht bei den Aufnahmen neben der eigentlichen Dokumentation ein Nachweis, wer zu welchem Zeitpunkt welche Untersuchungshandlungen an welcher Stelle vorgenommen hat.

2.4.3.5 Skizzen und Zeichnungen

Skizzen und Zeichnungen werden zur Darstellung des Ereignisortes, zur Ergänzung von Beschreibungen, zur Veranschaulichung von Sachverhalten benötigt. Weiterhin haben sie die Aufgabe, in Ergänzung zur Protokollierung und fotografischen Dokumentation, den Tatort in seinen maßlichen Zusammenhängen darzustellen.

Ein weiterer Vorzug von Zeichnungen und Skizzen wird besonders bei der komplexen Darstellung der baulichen Charakteristik eines Gebäudes, des technischen Zustandes und der Prozessschemata deutlich. Skizzen sind auch hilfreich bei der Auswertung von Lichtbildern, wenn der jeweilige Standort des Fotografen und die Aufnahmerichtung eingetragen werden.

Im Allgemeinen sind auf den Fotografien der Brandstelle Details nur schwer zu differenzieren, hingegen kann eine detailreiche Zeichnung wesentliche Zusammenhänge veranschaulichen.

Bei der Anfertigung von Zeichnungen (ersatzweise Skizzen) ist zu beachten, dass sie nicht nur ein ergänzendes Beiwerk darstellen, sondern einen hohen ermittlungsseitigen Stellenwert (Sachbeweis) erlangen können. Aus diesem Grunde sollen die Skizzen und Zeichnungen möglichst exakt und eindeutig ausgeführt werden. Dabei sind die Empfehlungen an eine Einhaltung gültiger Normen und Darstellungsregeln hinsichtlich Maßstab, Format, Linienart, Schnittkennzeichnung hilfreich. Weiterhin sollen festgelegte Zeichen und Signaturen, eine Legende zur Erläuterung der Zeichen, ein Schriftfeld, der Nordpfeil, eine Maßangabe sowie die zum Zeitpunkt des Ereignisses herrschende Windrichtung enthalten sein. In den meisten Fällen kann bereits auf vorliegende Lagepläne, Grundrisskizzen sowie Darstellungen der technischen Prozessabläufe zurückgegriffen werden. Hierbei ist jedoch eine kritische Überprüfung nötig, da oftmals Pläne und Zeichnungen ungenau erstellt wurden bzw. Veränderungen nicht berücksichtigt sind.

Für die Vermessung komplizierter Brandobjekte empfiehlt sich der Einsatz einer 3D-Dokumentation. Die verschiedenen Verfahren haben den Vorteil, dass alle benötigten Maße mit hoher Genauigkeit ermittelt und entsprechende Zeichnungen rechnergestützt gefertigt werden können. Spezielle Computerprogramme ermöglichen eine virtuelle und standortunabhängige Begehung des Objektes.

Grundsätzlich müssen bei jeder Brandstelle, auch wenn die Erstellung einer Zeichnung nicht erforderlich erscheint, zumindest die Hauptmaße festgehalten werden. Ersatzweise geschätzte Maße eines Raumes oder Objektes können für nachträgliche Betrachtungen von Nutzen sein.

Für die spätere Zuordnung der Skizze zum Skizzenfertiger ist die Angabe dessen Namens erforderlich, wobei eine Signatur oder Unterschrift den Beweiswert erhöht.

2.4.3.6 Digitales Kartenmaterial über das Internet

Verschiedene Hersteller haben beispielsweise eine auf unterschiedlichsten PCs lauffähige und kostenlose Software entwickelt. Neben der einfachen Navigation auf der Erdoberfläche wurden eine Suchfunktion und ein Messwerkzeug integriert. Über ein Auswahlmenü lassen sich die unterschiedlichsten Kartenschichten ein- und ausblenden und eigene Punktkoordinaten abspeichern.

Für die Darstellung eines Ereignisortes und seines Bezuges zu seiner eigenen Peripherie sind die Luftbilder trotz der begrenzten Auflösung bestens geeignet.

2.5 Erfassung technischer Prozesse und sicherheitstechnischer Aspekte

2.5.1 Zustände, Abläufe, Nutzungsweisen, Unregelmäßigkeiten

Im Rahmen der Brandursachenermittlung reicht es nicht aus, nur Informationen über die Art, Menge und Eigenschaften der vorhandenen brennbaren Stoffe sowie deren räumliche Verteilung zu beschaffen. Vielmehr ist eine Erfassung und Analyse der gesamten technischen Verfahren und der Technologie notwendig.

Jedes technische Verfahren beruht auf einer Folge von einzelnen Arbeitsschritten, zu deren Vorbereitung, Einleitung, Durchführung, Kontrolle und Beendigung technische Maßnahmen und individuelle Arbeitsverrichtungen erforderlich sind. Dabei können die Bedingungen des Produktionsprozesses vollkommen unterschiedlich sein. Zusätzlich ist der Automatisierungsgrad dieser Prozesse zu beachten. Ein technischer Prozess wird durch verschiedene Parameter beschrieben, deren Beachtung zur objektiven Bewertung einer Brandursache beiträgt.

In diesem Zusammenhang sind beispielsweise folgende Größen und Gesichtspunkte bedeutsam:

2.5.1.1 Stoffsystem

- Toxizität, Brennbarkeit, Oxidationsmittel, Zerfallsneigung u. a.
- Zusammenwirken der Stoffkomponenten
- exotherme Reaktionen, Katalysatoren, Korrosion u. a.

2.5.1.2 Prozessdaten

- Druck und Druckgradienten
- Temperatur und Temperaturgradienten
- relative Luftfeuchte

- Strömungsgeschwindigkeiten
- Reaktionsgeschwindigkeiten
- bewegliche Anlagenteile u. a.

2.5.1.3 Ausrüstungen

- Material
- Ausführung
- zeitliche Veränderungen, wie Alterung, Verschleiß

2.5.1.4 Prozessführung und Betriebszustände

- Betrieb (Istzustand, Gefahrenzustand)
- gestörte Betriebszustände
- transportierte Stoffmenge, Materialfluss
- Reinigung, Wartung und Pflege
- Instandsetzung

2.5.1.5 Betriebsstruktur

- Kopplungen von Prozessen und Verfahrensstufen
- Kopplungen von Ausrüstungen und Teilanlagen
- Organisationsmängel

2.5.1.6 Ver- und Entsorgungssysteme

- Elektroenergie, Kühlwasser, Steuerluft u. a.
- Entaschung, Schmutzwasserableitung, Rauchgasreinigung

2.5.1.7 Externe Ursachen

- Naturgewalten

2.5.1.8 Menschliches Handeln und Unterlassen

Unabhängig vom Brandobjekt ergeben die Bauzeichnungen, die dazugehörigen Lagepläne sowie die vorhandenen Brandschutz- und Feuerwehrpläne einen ersten Überblick über die technischen Abläufe. Besondere Bedeutung besitzen konkrete Anlagendoku-

mentationen mit den dazugehörigen sicherheitstechnischen Bewertungen und den einschlägigen Betriebs- und Unfallverhütungsvorschriften.

Ein wesentlicher sicherheitstechnischer Aspekt ist beispielsweise, dass die vorgegebenen Wartungs- und Prüffristen eingehalten werden. In diesem Zusammenhang muss geprüft werden:

- ob Reparaturen oder Veränderungen an der Anlage bzw. am Material vorgenommen wurden,
- ob Maßnahmen auf Grund behördlicher Beanstandungen fristgerecht durchgeführt wurden und
- inwieweit Störungen des Betriebes vorgelegen haben.

Derartige Störungen ergeben häufig Hinweise auf einen gefährlichen Zustand. Im Übrigen geben in vielen Fällen die Betriebsbücher wertvolle Informationen.

Der konkrete Produktionsablauf lässt sich an einer vergleichbaren Anlage ableiten. Fotos und Skizzen, die das Objekt vor dem Brand darstellen, ergänzen die notwendigen Ausgangsangaben.

Betriebseigene Unterlagen und Dokumente der Prozessleittechnik, wie Schreiberstreifen, Druckerlisten, Messprotokolle und eventuell installierte Datenträger, sind zu überprüfen. Daraus lassen sich die Prozessdaten und Abweichungen rekonstruieren. Alle Daten der Mess-, Steuer- und Regeltechnik (MSR) müssen erfasst und dokumentiert werden. In ähnlicher Weise ist bei der Vergleichsanlage zu verfahren.

Relevante Anlagenprotokolle sind bei Ermittlungsverfahren durch die Polizei oder die Staatsanwaltschaft im Original sicherzustellen.

Entsprechend den Brandschutzvorschriften der Bundesländer muss in Gebäuden und Einrichtungen mit einem erhöhtem Brand- oder Explosionsrisiko in regelmäßigen Abständen eine Brandschau (Brandverhütungsschau, Feuerbeschau) durchgeführt werden. Das gleiche gilt für Gebäude und Einrichtungen, in denen bei Ausbruch eines Brandes oder bei einer Explosion eine große Anzahl von Personen oder erheblichen Sachwerten gefährdet werden. Die Ergebnisse dieser brandschutztechnischen Überprüfung sind von den zuständigen Behörden bzw. dem Betreiber anzufordern und in die Bewertung einzu beziehen. Der Vollzug der angeordneten Maßnahmen ist zu prüfen.

2.5.2 Brandsicherheits- und Alarmierungseinrichtungen

Brandwarn- und Brandmeldeanlagen

Brandwarn- und Brandmeldeanlagen werden für die frühzeitige Erkennung und Meldung von Bränden eingesetzt bzw. dienen Personen zur direkten Alarmierung bei Brandgefahr.

Sie können auch zum Auslösen einer Übertragungseinrichtung für Brandmeldungen, einer Alarmierungseinrichtung und zur Steuerung von Brandschutzeinrichtungen genutzt werden. Eine Feststellung der Faktoren, ob und zu welchem Zeitpunkt die Brandwarn- und -meldeanlagen wirksam wurden, ermöglichen Schlussfolgerungen zum Bereich des Brandausbruches sowie auf die weitere Brandausbreitung.

Zu ermitteln sind:

- Anlagentyp, Funktionsweise, Schleifenaufteilung und Meldertyp
- Eignung der verwendeten Melder unter Berücksichtigung der Ansprechzeiten und der von den Stoffen ausgehenden Brandkenngößen
- Reihenfolge der Melder- und Schleifenauslösungen (Protokoll)
- Ort der Registrierung der Alarmauslösung
- Kenntnisse über Fehlalarme und daraus resultierende Maßnahmen
- Feststellung der Strömungsrichtung im Brandobjekt zur Bewertung der Auslöse-reihenfolge
- Prüffristen sowie die Ergebnisse der durchgeführten Prüfungen
- Außerbetriebsetzungen

2.5.3 Baulicher Brandschutz sowie die Wirksamkeit beeinflussende Zustände und Ausstattungen

2.5.3.1 Baustoffe und Bauteile nach DIN 4102

Baustoffe und Bauteile sind entsprechend ihrem Brandverhalten klassifiziert. Es wird grundsätzlich unterschieden zwischen nichtbrennbaren und brennbaren Baustoffen.

- Bauaufsichtliche Benennung der Baustoffe nach DIN 4102-1
- Einteilung von Bauteilen in Feuerwiderstandsklassen nach DIN 4102-2
- Feuerwiderstandsklassen wesentlicher Bauteile
- Verwendbarkeitsnachweise von Bauprodukten
- Europäische Klassifizierung von Bauprodukten nach ihrem Brandverhalten
- Europäische Feuerwiderstandsklassen

2.5.3.2 Brandverhalten von Baustoffen nach DIN 4102-1

Das Brandverhalten der Baustoffe nach DIN 4102 wird in zwei Klassen eingeteilt (siehe Abschnitt 1.4.3).

Diese Klassen werden unter ganz spezifischen Prüfbedingungen ermittelt, die in der Norm festgelegt sind. Derartige Bedingungen sind daher in der Praxis in der Regel eher

nicht zu erwarten. Für die Abschätzung des Feuerwiderstandes und der Zündneigung sind diese Klassen aber durchaus hilfreich. Im Unterschied zur nationalen Klassifizierung nach der deutschen Norm DIN berücksichtigt das europäische System, das in das deutsche Baurecht bereits eingeführt wurde, eine größere Vielfalt von Klassen und Eigenschaften. Der Übergang von deutschen auf europäische Prüf- und Klassifizierungsverfahren stellt eine wesentliche Veränderung dar, auch wenn in den Landesbauordnungen die bauaufsichtlichen Begriffe „nicht brennbar“, „schwer entflammbar“, „normal entflammbar“ sowie „feuerhemmend“ und „feuerbeständig“ beibehalten wurden.

Zusätzlich zur Beschreibung des Brandverhaltens werden nunmehr Nebenerscheinungen wie Rauchentwicklung („s“) und brennendes Abtropfen oder Abfallen („d“) berücksichtigt. Diese Norm ist als mehrteilige DIN EN 13501 erschienen. Für eine längere Übergangsfrist gilt noch die deutsche Norm DIN 4102.

Tab. 1: Übersicht zur deutschen und europäischen Normung

Bauaufsichtliche Benennung	Zusatzanforderung		europäisch DIN EN 13501	deutsche DIN 4102
	ohne Rauch	ohne brennendes Abtropfen/Abfallen		
nicht brennbar	•	•	A1	A1
	•	•	A2 - s1 d0	A2
schwer entflammbar	•	•	B, C - s1 do	B1
		•	A2 - s2 d0 A2, B, C - s3 d0	
	•		A2, B, C - s1, d1 2, B, C - s1 d2	
			A2, B, C - s3 d2	
normal entflammbar		•	D - s1 d0 D - s2 d0 D - s3 d0 E	B2
			D - s1 d2 D - s2 d2 D - s3 d2	
			E - d2	
leicht entflammbar			F	B3

Daneben sind auch zusätzliche Kennzeichnungen zur Klassifizierung entwickelt worden.

Tab. 2: Übersicht zusätzlicher Kennzeichen

Kurzzeichen	Herleitung	Kriterium
R	R ésistance	Tragfähigkeit
E	E tanchéité	Raumabschluss
I	I solation	Wärmedämmung bei Brand
W	R adiation	Begrenzung des Strahlendurchtritts
M		mechanische Einwirkung auf Wände
S	S moke	Begrenzung der Rauchdurchlässigkeit
C	C losing	Selbstschließende Eigenschaft
P		Aufrechterhaltung der Energieversorgung
..200, ..300, ..(°C)		Angabe der Temperaturbeanspruchung
s	s moke	Rauchentwicklung
d	d roplets	brennendes Abtropfen/Abfallen

2.5.3.3 Feuerwiderstand von Bauteilen

Ein Brand kann sich durch eine Baukonstruktion hindurch nur dann ausbreiten, wenn ihr Feuerwiderstand überwunden wurde. Das ist vor allem eine Frage der Zeit und der Art der Brandeinwirkung auf die Baukonstruktion. In der DIN 4102 wird der Begriff der Feuerwiderstand bzw. Feuerwiderstandsdauer unter den dort angeführten Versuchsbedingungen definiert; diese entsprechen nur in seltenen Fällen jenen des realen Brandes (siehe 1.3.4, Realbrand in Abb. 13, ETK in Abb. 14).

Bei der Feststellung des zum Brandausbruchzeitpunkt vorhandenen Feuerwiderstandes der Baukonstruktion ist zu beachten, ob die einzelnen Bauelemente ihren vollen Feuerwiderstand besaßen, d. h. nicht teilweise oder stellenweise geschwächt waren. Auch brandbedingte mechanische Beschädigungen während des Brandes können zu einer Schwächung der Baukonstruktion führen. Es ist festzustellen, ob Öffnungen zum Zeitpunkt der Brandentstehung und während der Brandentwicklung verschlossen waren.

Diese Prüfung gilt insbesondere für alle mit Brandschutzverschlussvorrichtungen (Brandschutztüren, Brandschutzklappen) versehenen Öffnungen in der Baukonstruktion, da durch sie im geschlossenen Zustand die Brandausbreitung verhindert bzw. einge-

schränkt werden soll. Bei unverschlossenen Öffnungen in der Baukonstruktion ist zwischen benachbarten Räumen eine schnelle Ausbreitung des Brandes möglich.

2.5.3.4 Öffnungen in Zwischenwänden, Decken und Außenwänden

Öffnungen in umschließenden Baukonstruktionen von Räumen oder Gebäuden können die Brandausbreitung begünstigen, wobei dies in zweifacher Hinsicht möglich sein kann. Durch diese Ventilationsöffnung erfolgt die Luftzufuhr, wodurch ein Weiterbrennen ermöglicht wird. Außerdem verlassen die heißen Rauchgase den Brandraum durch diese Öffnungen in Richtung Umgebung oder sie dringen in benachbarte Bereiche ein. So kann z. B. ein Brand durch geöffnete Fenster oder Türen intensiviert werden. Bei Öffnungen in den Umfassungswänden von Brandräumen ist neben der Größe der Raumöffnung von grundlegender Bedeutung, in welcher Höhe sich diese in Bezug auf die Bodenfläche sowie zur Decke des Brandraumes befindet. Ist der Abstand von der Oberkante der Öffnung zur Decke verhältnismäßig groß, kann sich eine hohe Heißgas-schicht ausbilden. Erreicht diese die Oberkante der Öffnung, strömen die heißen Rauchgase ab.

Bestehen die Einfassungen solcher Öffnungen aus brennbaren Stoffen, können diese durch die Berührung mit den heißen Rauchgasen erwärmt und sogar entzündet werden (z. B. Tüzzargen, Türblatt, Fensterrahmen). Durch die aus den Ventilationsöffnungen ausströmenden heißen Rauchgase und herausschlagende Flammen kann die Brandausbreitung auf weitere Gebäudeteile wie auf das darüber liegende Stockwerk oder in benachbarte Räume erfolgen. Dabei geschieht die Ausbreitung des Brandes auf darüber liegende Stockwerke durch Berührung mit den heißen Rauchgasen, Hindurchschlagen der Flammen oder Übertritt von Funken. Bei Öffnungen in den Fußböden erfolgt eine Brandausbreitung in die darunter liegenden Stockwerke vorwiegend durch Herabfallen von brennenden Gegenständen und Abfließen oder Abtropfen von brennenden Materialien. Im Falle, dass Öffnungen mit brennbaren Materialien (Holzbretter, Erntegut) verstellt oder verschlossen waren und während des Brandes durchbrennen, kann eine Brandübertragung begünstigt werden. Die heißen Rauchgase erfahren wegen ihrer geringeren Dichte einen Auftrieb (Konvektion); daher sind Öffnungen zu beachten, wo sich eine Kaminwirkung einstellt. Das zeigt sich z. B., wenn die heißen Rauchgase aus dem Brandraum in Schächte oder Treppenhäuser strömen und so zur raschen vertikalen Brandausbreitung führen.

2.5.3.5 Versorgungstechnik – Technische Gebäudeausrüstung

Technische Einbauten und Ausstattungen wirken vielfach begünstigend auf die Brandausbreitung. Ihre richtige Bewertung ist für die Ermittlung der Brandursache zwingend notwendig. Solche Ausstattungen sind Einbauten, wie u. a. Aufzug- und Fahrstuhl-schächte, Rohr- und Kabelschächte oder -kanäle, Be- und Entlüftungsanlagen, Absauganlagen, Förderanlagen.

Sie können nicht nur zu einer schnellen Rauch- und Brandausbreitung führen, sondern auch die Brandbekämpfung erheblich erschweren. Durch eine Sog- oder Kaminwirkung können aber auch Funken und Flammen in solche Einbauten transportiert werden,

wodurch eine weitere schnelle Brandausbreitung auf andere Räume gegeben ist. Be- und Entlüftungsanlagen werden in vielen Fällen nicht nur für einen Raum angelegt. Vielmehr bestehen sie aus einem System von Schächten und Kanälen, die damit einzelnen Räume eines Gebäudes miteinander verbinden, so dass die Gefahr der Brandausbreitung auch auf entferntere Räume besteht. In Lüftungskanälen werden zur Begrenzung von Brandabschnitten auch Klappen eingebaut, deren thermische Ansprechschwelle zu beachten ist. Eine ähnliche Problematik ergibt sich auch bei den Rauch- und Wärmeabzugsanlagen (RWA).

Brandschutzkonstruktionen werden unwirksam, wenn Durchführungen von Rohren und Leitungen durch Wände und Decken nicht entsprechend den Anforderungen (MLAR – Muster-Leitungs-Anlagen-Richtlinie) verschlossen sind.

2.6 Spuren

2.6.1 Grundprinzipien der Suche und Sicherung von Spuren

Es ist eine weitverbreitete Auffassung, dass die Brandursachenermittlung in erster Linie eine Erfahrungssache sei. Dem ist prinzipiell zuzustimmen, denn bei der unendlichen Vielfalt, mit der sich die verschiedenartigsten Objekte nach einem Brand darstellen, stellt sich bei einem unerfahrenen Brandursachenermittler rasch Ratlosigkeit ein. Deshalb ist es für jeden Brandursachenermittler wichtig zu wissen, stets zielgerichtet und nach bestimmten Grundprinzipien vorzugehen, d. h. nicht planlos an der Brandstelle nach Zufallsspuren zu suchen und von einem in bestimmten Fällen enorm hohen Zeitaufwand auszugehen. Denkbar wären theoretisch nachfolgende Vorgehensweisen:

1. eine ausschließliche Berücksichtigung von Zeugenangaben,
2. die ausschließliche Untersuchung des Brandortes und der Brandspuren,
3. Untersuchung des Brandortes und die Berücksichtigung von Zeugenaussagen

Jede dieser Varianten hat Vor- und Nachteile. Am wenigsten geeignet erscheint die unter 1. genannte Methode. Einerseits gibt es nicht immer Zeugen bei einem Brand und andererseits tragen die Wahrnehmungen eines Zeugen immer einen subjektiven Charakter, die zum Teil widersprüchlich und oft bezüglich der Brandursache insgesamt wenig aussagefähig sind. Nicht zu vergessen ist weiterhin die Tatsache, dass Zeugenangaben zu einem späteren Zeitpunkt widerrufen werden können und dadurch die Beweisführung erschwert oder unmöglich gemacht wird. Anwendbar ist diese Methode nur, wenn das Brandobjekt zum Beispiel weitgehend vernichtet wurde.

Bei der unter 2. genannten Methode wird der Brandursachenermittler den Ereignisort systematisch untersuchen, anhand der vorhandenen Brandspuren geeignete Rückschlüsse zum Brandverlauf, zum Brandausbruchsbereich und unter Umständen zur Brandursache ziehen.

Da Zeugenangaben keinerlei Berücksichtigung finden, besteht auch keine Gefahr der subjektiven Verfälschung des Untersuchungsergebnisses. Nachteilig wirkt sich allerdings aus, dass der Zeitaufwand enorm hoch sein wird, insbesondere wenn entscheidende Angaben zur Brandwahrnehmung, zum Löschgriff oder zur ursprünglichen Einrichtung des Brandobjektes fehlen.

Es ist somit ersichtlich, dass die ausschließliche Auswertung von Brandspuren als alleinige Quelle der Erkenntnis ebenso unzureichend ist wie die unter 1. genannte Methode.

Effektiv und erfolgversprechend kann grundsätzlich nur Variante 3 sein, d. h. die Befragung von Zeugen sowie die objektive Untersuchung des Brandortes als zwei notwendige, einander ergänzende Elemente der Brandermittlung zu betrachten. Wichtig ist es dabei, Zeugenangaben einer kritischen Überprüfung zu unterziehen und diese mit den objektiven Befunden am Brandort zu vergleichen. Diese Verfahrensweise gestattet ein rationelles Arbeiten und ermöglicht darüber hinaus, eventuelle Widersprüche in Aussagen von Zeugen aufzudecken und unrichtige Angaben zu erkennen.

Das Ziel der Brandursachenermittlung besteht darin, anhand von Brandspuren, die zu suchen, zu sichern, zu dokumentieren und auszuwerten sind, Rückschlüsse auf die Brandursache ziehen zu können. Über die Rückverfolgung des Brandverlaufes sind der Brandausbruchsbereich bzw. die Brandausbruchsstelle zu ermitteln und danach im so genannten direkten Verfahren (siehe 3.2) oder meistens im Ausschlussverfahren (Eliminationsverfahren, siehe 3.1) die brandauslösende Zündquelle festzustellen.

Am Brandort sind zunächst das Brandobjekt, anschließend der Brandraum und im Weiteren der Brandausbruchsbereich oder sogar die Brandausbruchsstelle festzustellen. Erst nach Feststellung des Brandausbruchsbereiches bzw. der Brandausbruchsstelle können begründete Versionen zur Brandursache aufgestellt werden.

Dabei sind alle denkbaren Zündquellen zu untersuchen, die in dem ermittelten Brandausbruchsbereich bzw. der Brandausbruchsstelle wirken konnten.

Es ist beispielsweise unsinnig, an einer zweifelsfrei bewiesenen Brandausbruchsstelle, an der keine elektrischen Installationen oder Geräte vorhanden waren, die Zündung durch Fehlerstrom anzunehmen. Ebenso wenig ist über eine Selbstentzündung von Erntegut zu diskutieren, wenn der Brand in einem Teil der Scheune ausgebrochen ist, in dem nachweislich kein Erntegut gelagert war. Wird dagegen nach einer Brandursache gesucht, bevor der Brandausbruchsbereich, die Brandausbruchsstelle ermittelt wurde, müssten bedeutend mehr Brandursachen unterstellt werden. Nur in den Fällen, in denen aus unterschiedlichen Gründen kein Brandausbruchsbereich oder gar Brandraum ermittelt werden kann, ist ein erhöhter Arbeitsaufwand erforderlich und sinnvoll.

Auch wenn durch mehrere Zeugen übereinstimmend und glaubhaft eine Brandentstehung beobachtet wurde, hat immer die Suche, Sicherung und Dokumentierung aussagefähiger objektiver Brandspuren zu erfolgen.

Brandausbruchsbereich/Brandausbruchsstelle, primärer Brandbereich

Kann mit Hilfe der verschiedenen Brandspuren, die in Abschnitt 2.6 detailliert besprochen werden, der Brandausbruchsbereich oder gar der primäre Brandbereich lokalisiert werden, sind insbesondere folgende Maßnahmen veranlasst:

- fotografische Dokumentation des unveränderten Brandraumes in verschiedenen Ansichten
- Vermessen des Raumes und Anfertigung einer maßstabsgerechten Skizze
- Erfassung der Zu- und Abluftwege
- Vermessen entsprechender Öffnungen unter der Berücksichtigung ihrer Lage und Größe
- Verschlusszustand der Raumöffnungen
- Feststellung der vorhandenen brennbaren und nicht brennbaren Stoffe im Raum, deren Brandlastdichte und Zustand

Der ersten Besichtigungsphase des Brandraumes schließt sich die sorgfältige Beräumung an, indem der Brandschutt sukzessive entfernt und hinsichtlich feststellbarer Sachverhalte bewertet wird.

Hierbei sind insbesondere die Zonen vorhandener Einbrennspuren, die Schichtung des Brandschuttes und besondere Spuren von Brandausbreitungen (z. B. trichterförmige Schäden, bis zum Fußboden reichende Spuren) zu erfassen. Bereiche mit tieferen bzw. lokal konzentrierteren Einbrennspuren bei ansonsten gleichmäßiger Verteilung der Brandstoffe im Raum können erste Anhaltspunkte für einen möglichen Brandausbruchsbereich geben. Gegenstände, die vor den Untersuchungen aus dem Brandraum geborgen wurden, dürfen zur beweiskräftigen Ermittlung des Brandausbruchsbereiches nicht unbeachtet bleiben und müssen an die Entnahmestellen zurückgebracht werden. Über solche Maßnahmen der Rekonstruktion wird in Abschnitt 6.2 berichtet.

Die Beräumung kann bereichsweise von den Zugängen ausgehend erfolgen. Wichtig ist, dass systematisch vorgegangen und nicht ziellos an verschiedenen Stellen des Brandraumes gesucht wird. Es hat sich bewährt, größere Brandräume in Abschnitte einzuteilen. Die Festlegung von Untersuchungsabschnitten kann dabei anhand von besonderen räumlichen Gegebenheiten, von Stützen oder Säulen, von mehreren Fensteröffnungen oder mittels einer durchgeführten Vermessung vorgenommen werden.

Der Brandschutt ist auf keinen Fall nur grob zu sichten und zu untersuchen, weil dadurch wesentliche Details verloren gehen können. Erst der abschließend gesichtete Brandschutt kann mit größerem Gerät beräumt werden.

Die Beräumung sollte in jedem Falle so erfolgen, dass die Schichtung des Brandschuttes in Abhängigkeit von den baulichen Besonderheiten, den Einrichtungsgegenständen und der Größe des Brandraumes detailliert untersucht und dokumentiert wird. Aus der Schichtung im Brandschutt lassen sich die Reihenfolge der brandbedingt abgestürzten Teile sowie Hinweise zu den ehemals vorhandenen brennbaren Stoffen und möglichen

Einrichtungsgegenständen ableiten. Dies ist deshalb von Bedeutung, weil Bauwerksteile und Einrichtungsgegenstände bereits nach relativ kurzer Branddauer instabil werden bzw. brandbedingt beschädigt werden können. Sie können deshalb trotz vergleichsweise geringer Brandeinwirkung in der unteren Schicht des Brandschutttes liegen.

Vor der Durchführung der Beräumung ist zu klären, wo der abgetragene Brandschutt gelagert werden kann. Hinsichtlich einer Nachuntersuchung sollte der Brandschutt aus den unterschiedlichen Brandbereichen auch jeweils separat gelagert werden und nicht einfach auf einem großen Haufen bzw. in einen einzigen Container geschaufelt werden. Ebenfalls ist ein planloses Hin-und-Her-Bewegen von Brandschutt zu vermeiden.

Weiterhin sind die ursprünglichen Positionen von Bauteilen und Einrichtungsgegenständen zu markieren. Gleiches gilt für eingelagerte Stoffe und Materialien auf dem Boden und an den Wänden. Folgende Spuren bzw. Sachbeweise können beispielsweise bei der Beräumung festgestellt und gesichert werden, die für spätere Aussagen zum Brandverlauf von Bedeutung sein können:

- Spuren der im Brandschutt liegenden Bauteile, Einrichtungsgegenstände oder Anlagenteile,
- Beschläge von Türen und Fenstern
- Teile der elektrischen Anlage und Geräte (Schalter, Steckdosen usw.)
- lokal begrenzte Einbrennspuren im Fußboden oder in unteren Wandbereichen
- kompakte Zusammenbackungen im Brandschutt, die durch geschmolzene Kerzen, Kunststoffe oder Ähnliches verursacht wurden
- im Bodenbereich vor Fenstern liegende Glasscherben, die Rückschlüsse auf den Öffnungszustand des jeweiligen Fenstern zum Zeitpunkt der Brandentstehung ermöglichen
- Schlüssel im Brandschutt, gelegentlich eingeschmolzen

2.6.2 Brandspezifische und nicht brandspezifische Spuren

Spuren sind infolge von Einwirkungen entstandene, relativ beständige materielle Erscheinungen. Sie sind Quelle für Informationen über die Ursache, die Art und Weise, den Zeitpunkt und Ort ihrer Entstehung sowie unter Umständen auch über den Verursacher. Sie besitzen ein Informationspotential, dessen Qualität und Quantität von der Art und Weise der Spurenentstehung, d. h. den Wirkungen und Eigenschaften der beteiligten materiellen Systeme abhängig ist.

Im kriminalistischen Sinn weist eine Spur in der Phase der Spurensuche/-sicherung noch keinen unmittelbaren Beweiswert auf. Ihre Bedeutung bzw. ihr Beweiswert ergibt sich erst im Verlauf der weiteren Ermittlungsarbeiten.

Die am Ereignisort, d. h. am Brandobjekt, vorgefundenen Spuren in Form konkreter materieller Erscheinungen werden allgemein als Brandspuren bezeichnet. Unter Brandspuren werden folglich alle Erscheinungen verstanden, die durch die Einwirkung des Brandes auf Bauwerksteile, Einrichtungsgegenstände sowie eingelagerte oder eingebrachte Materialien usw. entstanden sind und die z. T. während aber vor allem nach einem Brand festgestellt wurden. Die in Form konkreter Branderscheinungen vorgefundenen Spuren sind in Abhängigkeit von der Dauer und Intensität des Brandes, insbesondere durch die Einwirkung von Rauch, Hitze und anderen Wirkungskriterien an den verschiedensten Stellen des Brandobjektes in unterschiedlicher Größe und Intensität vorzufinden. Grundsätzlich gilt, je länger der Brand wirkte und je mehr Brandstoffe verbrannt sind, umso schwieriger ist es, die entstandenen Brandspuren zu qualifizieren und später sicher bewerten zu können. Es ist eine besondere Problematik des Brandes, dass dieser in seinem weiteren Verlauf Spuren und Spureträger vernichtet und verändern kann.

In der Praxis der Brandursachenermittlung wird zwischen brandspezifischen bzw. brandtypischen und nicht brandspezifischen Spuren unterschieden.

Die für die Beurteilung der komplexen Prozesse eines Brandes vorhandenen Spuren können im Wesentlichen in

- Materialspuren und
- Situationsspuren

unterteilt werden.

Unter Materialspuren versteht man die für die Brandentstehung und Brandausbreitung maßgeblichen, durch den Brand aber veränderten Substanzen oder Gegenstände und/oder Bauteile. Unter Situationsspuren sind Anordnung, Lage und Zuordnung von Spuren (Spurenlage) oder Gegenständen zueinander und zu deren Umgebung zu verstehen. Sie werden nicht untersucht, sondern nur zwecks Rekonstruktion des Tathergangs berücksichtigt (Herstellung einer Beweiskette). Situationsspuren ergeben sich aus der besonderen räumlichen Lage und der Zuordnung von Brandspuren oder Gegenständen bzw. Substanzen zueinander bzw. zu deren Umgebung.

Brandspezifische Erscheinungen, wie z. B. die Rauchfarbe und -intensität, die Flammenfärbung, aber auch Brandgeruch oder durch den Brand ausgelöste Geräusche, sind vor allem vom individuellen Wahrnehmungsvermögen abhängig.

Es ist deshalb Vorsicht geboten, wenn derartige Spuren nicht durch eigene Wahrnehmungen erfasst wurden, sondern auf der Grundlage von Zeugenangaben bewertet werden müssen.

Nach Möglichkeit sollte der Brandermittler die Zeugen selbst befragen, sich zu deren Standorten begeben, um sich von dort aus ein eigenes Bild zu verschaffen.

Die nicht durch den Brand unmittelbar verursachten Spuren (nichtbrandspezifische Spuren) können geeignet sein, Aufschluss über Umstände und Handlungen am Brandobjekt,

im Brandraum bzw. in dem primären Brandbereich zu geben. Die nicht brandspezifischen Spuren sind beispielsweise Form-, Material-, Situations- und Gegenstandspuren, daktyloskopische, ballistische, molekulargenetische und technische Spuren. Sie sind in erster Linie als kriminalistische Spuren zu bezeichnen. Der Brandursachenermittler muss seine ganze Aufmerksamkeit beiden Spurenarten schenken. Die Notwendigkeit der gezielten Spurensuche und -sicherung ergibt sich insgesamt daraus, dass zwischen nicht brandspezifischen und brandspezifischen Spuren fast ausschließlich ein ursächlicher oder unmittelbarer Zusammenhang besteht.

2.6.2.1 Rauchgasniederschläge

Entsteht in einem geschlossenen oder ungenügend ventilierten Raum ein Brand, stellt sich in Abhängigkeit von der Raumgröße, der Menge, der Art und dem Verteilungsgrad des brennbaren Materials mehr oder weniger schnell ein Sauerstoffdefizit ein, in dessen Folge es zu einer unvollständigen Verbrennung kommt. Die freiwerdenden Rauchgase sind mit Ruß und einer Vielzahl unterschiedlichster Pyrolyseprodukten durchsetzt. Bei kleinen Brandräumen ohne Ventilationsöffnungen kann es infolge der Sauerstoffverarmung zum Verlöschen des Brandes kommen. Im Falle einer Fortentwicklung des Brandes kommt es zur Ausbildung einer Heißgasschicht vor allem im Deckenbereich. Innerhalb dieser Heißgasschicht (siehe Glossar) kommt es zu einer Anreicherung der vorgenannten Pyrolyseprodukte, so dass sich Ruß und andere Pyrolyseprodukte zunächst an den noch kalten Flächen niederschlagen.

Die Flächen, an denen sich diese Pyrolyseprodukte niederschlagen können, müssen eine deutlich geringere Oberflächentemperatur im Vergleich zu der Temperatur der Heißgasschicht aufweisen. In der Regel findet man deshalb bei vielen Bränden Rauchgasniederschläge nur an der Decke und an den angrenzenden Wänden im oberen Bereich, wobei sich diese Spuren vor allem in der Anfangsphase des Brandes ausbilden. Hierbei gilt es zu beachten, dass sich in Räumen mit definierten, aber diskreten Ventilationsbedingungen (Zuluft, Abluft) deutlich nachvollziehbare Rauchgashorizonte in einer konkreten Höhe ausbilden können. Eine Rückbildung dieser Spuren tritt auch bei einem späteren Temperaturanstieg aber weiterhin vorhandener Rauchgasschicht nicht ein, weil es im Bereich der vor allem durch einen hohen CO₂-Anteil geprägten Rauchgasschicht zu keiner Nachverbrennung kommen kann. Im Falle, dass der Brand von einem ventilationsgesteuerten in einen brandstoffgesteuerten Verlauf wechselt, sind Veränderungen an den Rauchgasniederschlägen möglich. Bedingt durch die auftretenden hohen Temperaturen ist ein teilweises oder auch vollständiges Abbrennen der bereits entstandenen Rauchgasniederschläge im oder auch außerhalb des Brandraumes möglich. Dieser Effekt weist darauf hin, dass in diesen Arealen entsprechend hohe Temperaturen geherrscht haben müssen; Ruß verbrennt nämlich bei Temperaturen über 750 °C.

Auf Grund einer sich durch den Brand einstellenden Druckerhöhung im Brandraum, aber auch durch die Thermik der Rauchgase entweichen die Rauchgase über vorhandene oder sich im Brandverlauf einstellende Öffnungen, z. B. durch die brandbedingte Zerstörung von Fensterscheiben, nach außen. An den kalten Wandflächen bewirken die mitgeführten Pyrolyseprodukte oberhalb der Austrittsöffnungen die Ausbildung von so genannten Rußfahnen (siehe Glossar).

Wenn durch eine intensive Brandeinwirkung derartige Gebäudeflächen stark aufgeheizt wurden, fehlen oftmals solche Rußniederschläge.

Ausgesparte rußfreie Flächen innerhalb der Rauchgasniederschläge erlauben darüber hinaus Rückschlüsse auf die Lage von Gegenständen, Tieren oder Personen während des Brandes, wenn diese nach dem Brand entfernt wurden. So kann beispielsweise die Stapelhöhe von Erntegut oder die Position von Möbeln oder Bildern rekonstruiert werden.

Eine analytische Untersuchung von Rauchgasen und Rauchniederschlägen auf organische und anorganische Bestandteile ist möglich und lässt teilweise Rückschlüsse auf die am Brand beteiligten Stoffe und den Charakter des Brandes (brandlastgesteuert bzw. ventilationsgesteuert) zu. Rückschlüsse zum Brandverlauf und zum verbrannten Material sind auf der Grundlage der Untersuchung des beim Brand entstandenen Rußes derzeit eher nur eingeschränkt möglich.

2.6.2.2 Brandnarben, Ein- und Verbrennungen

Durch die thermische Belastung infolge Wärmeleitung, Konvektion und Wärmestrahlung oder durch direkten Flammenkontakt verändern die Werkstoffe materialspezifisch ihre Topographie oder sogar Morphologie.

Da diese Veränderungen insbesondere bei nichtschmelzenden Feststoffen teilweise erhalten bleiben, können sie auch nach dem Ablöschen eines Brandes zur Beurteilung des Brandgeschehens herangezogen werden.

Die auffälligsten Spuren entstehen bei der thermischen Belastung von Holzoberflächen und duroplastischen Kunststoffen. An der Oberfläche kommt es zur Verbrennung der zahlreich freigesetzten brennbaren flüchtigen Substanzen (Pyrolyse) und auch zu einer Zerstörung oberflächennaher Schichten. Mit der Fortdauer der thermischen Exposition schreitet der Pyrolyseprozess sukzessive in tiefere Schichten vor und hinterlässt eine mechanisch relativ stabile Verkohlungs-schicht. In Abhängigkeit von der Expositionsdauer, der Intensität der thermischen Exposition und den Materialeigenschaften des Holzes bilden sich unterschiedlich starke Kohleschichten aus. Diese Kohleschichten sind stark strukturiert, d. h. durchsetzt von Spalten bzw. Rissen. Dieses Erscheinungsbild der oberflächennahen Zerstörung wird als Brandnarbe oder allgemeiner auch als Brandzehrung bezeichnet und überdauert häufig das Brandgeschehen.

Die Brandnarben weisen in der Regel drei aufeinander folgende Schichten auf: geschwärzte Brandnarbe (Holzkohle; Pyrolysekohle) – gebräunte Übergangszone der Pyrolyse – unversehrtes Holz. Die Übergangszone erscheint im Schnitt insbesondere nach einer intensiven Hitzeeinwirkung schmal (großer Farbgradient), während sie bei einer lang andauernden aber eher mäßigen thermischen Belastung breiter sein kann (geringer Farbgradient). Siehe auch Kapitel 1, Abb. 4.

Deshalb kann nach einem Brand durch Bestimmen der Brandnarbentiefe eine wesentliche Information über das Brandgeschehens erzielt werden. So kann die Tiefe der Pyrolysekohleschicht durch vollständiges Abtragen der spröden Brandnarbe ermittelt werden. Auch das Einstechen spitzer Gegenstände oder die Zuhilfenahme des Tiefenmaßes einer Schiebelehre kann zur Bestimmung der Verkohlungstiefe herangezogen werden. Die Lage der vormaligen Holzoberfläche kann bei Berücksichtigung der vorhandenen unversehrten Oberflächen im Nahbereich der Brandnarbe oder durch die Länge der vom Brand freigelegten Nägel oder Schrauben bestimmt werden.

Ein orthogonaler Schnitt durch die Holzproben liefert direkt das Querschnittsbild der drei vorgenannten Schichten, wobei mittels mehrerer Schnitte ein Schädigungsprofil auf der Holzoberfläche abgeleitet werden kann (siehe 1.1, Abb. 4).

Zur Bestimmung der Brandnarbentiefe bzw. der Einwirkungsdauer eines Feuers kann die lineare Abbrandgeschwindigkeit genutzt werden.

Tab. 3: Abbrandgeschwindigkeit ausgewählter Holzarten (Kordina, K. und C. Meyer-Ottens unter Mitarbeit von C. Scheer: Holz Brandschutz Handbuch, hrsg. von der Deutsche Gesellschaft für Holzforschung e. V. München, 1994)

Holzart	Holzfeuchte in %	Rohdichte in kg m ⁻³	V in mm min ⁻¹
Fichte	8	433	0,74
	20	459	0,68
Buche	8	700	0,82
	20	689	0,76
Meranti	8	544	0,65
	20	559	0,56

Die Werte für die lineare Abbrandgeschwindigkeit unterscheiden sich dahingehend, ob eine Flammeneinwirkung parallel und senkrecht zur Faserrichtung erfolgte. Weiterhin hängt der Betrag aber auch von den Holzarten und der Anzahl der beflamten Seiten ab. Eine sichere Aussage zur Einwirkungsdauer kann nur bei einem Untersuchungsexperiment unter vergleichbaren Verhältnissen wie im Brandfall getroffen werden.

Aus der Brandnarbentiefe kann nicht nur auf die Branddauer geschlossen werden, sondern mittels Vergleichsbetrachtungen auch eine Aussage zur Richtung der Brandausbreitung getroffen werden. Dabei ist eine exakte Bestimmung der Brandnarbentiefe nicht erforderlich, sondern eben nur der Vergleich der Narbentiefe an unterschiedlichen Stellen der Oberfläche. Ein Materialschnitt zeigt direkt den Verlauf der brandbedingten Ausbildung der Tiefe von Brandnarben und damit die Richtung und u. U. die Intensität der Brandeinwirkung. Die Brandnarben besitzen, wie vorgenannt, aber nur dann für eine weiterführende Bewertung eine Bedeutung, wenn die ursprüngliche Lage der Holzteile

rekonstruiert werden kann. So ist es gelegentlich unerlässlich, Möbel oder Holzbauteile wie Paneele, Balken, Säulen u. a. im Brandraum hinsichtlich Lage bzw. Standort zu rekonstruieren.

Die flächigen Brandnarbengebilde können mit dem Spurenbild des so genannten Brandtrichters korrelieren, weil sie häufig die Konturen des Brandtrichters nicht nur augenscheinlich sondern auch ereignisbezogen (beweiskräftig) beschreiben.

Besitzt einerseits die räumliche Anordnung der Holzteile eine große Bedeutung für die Ausprägung eines typischen Brandspurenbildes, kommt andererseits den Strömungsverhältnisse im Brandraum eine hohe Bedeutung zu. Durch die Konvektion werden Heißgase an die Oberflächen herangeführt, was zumindest zu einer thermischen Aufbereitung oder zu einem begünstigten Abbrand führen kann.

Wechseln die Brandnarben in Form von scharfen Grenzen in thermisch gering oder unbeschädigtes Material über, so ist es naheliegend, auf eine thermische Verdämmung der unverbrannten Stellen etwa durch abgelegte Gegenstände oder z. B. durch Einrichtungsgegenstände zu schließen. Deshalb ist der Grund für die Ausbildung dieser brandgeschützten Bereiche stets zu ermitteln.

Ebenso markant sind auch relativ ausgeprägte zonierte Brandspuren, wie sie beim Abbrand von Brandbeschleunigungsmitteln entstehen, wenn diese z. B. auf Holz oder besonders saugfähigen Untergründen (z. B. Teppichboden) appliziert wurden.

Bei extrem lang andauernder Wärmeinwirkung entstehen nicht nur auffällige Brandnarben, sondern dies kann gelegentlich zum Durchbrand der Brandstoffschicht führen. Dies kann bei Glimm- oder Schwelbränden der Fall sein. Auch durch den Brand erhitzte Metallteile im Holz können zur Verfälschung eines ansonsten homogenen Spurenbildes führen.

Werden in einem Brandraum mehrere voneinander getrennte Bereiche mit Brandnarben bzw. mehrfach begrenzte Brandzehrungen festgestellt, ist von der Möglichkeit einer Mehrfachzündung im Sinne einer Brandstiftung auszugehen. Im Umkehrschluss ist es notwendig, die Möglichkeit der Ausbildung einer Brandbrücke oder eine Ausweitung des Brandes durch Flugfeuer oder brennend verlagertes Gegenstände auszuschließen.

Um Ein- und Verbrennungen beurteilen zu können, sind immer die Materialeigenschaften des brandbeschädigten Materials zu berücksichtigen. Wenn hierzu keine verlässlichen Literaturdaten herangezogen werden können, sind Brandversuche mit authentischem oder wenigstens artgleichem Material durchzuführen.

2.6.2.3 Trichterförmige Brandausbreitung

Die Entflammung von brennbarem Material erfordert die Übertragung der Zündenergie von der thermischen Quelle auf die Oberfläche des brennbaren Materials. Die Ausbreitung des Abbrandes wird bestimmt durch Konvektion, Wärmestrahlung und Wärmeleitung. Dabei kommt es zur thermischen Aufbereitung des Stoffes, d. h. Pyrolyse und schließlich zur Entflammung und somit zur Ausweitung der Brandvolumens.

Bei horizontal angeordneten homogenen Materialien erscheint bei punktförmiger Zündung die Brandspur deshalb als eine Kreisfläche. Durch Wind kann die Primärflamme geneigt werden, so dass eine ellipsenförmige Brandspur entstehen kann. Befindet sich die Zündquelle vor einer brennbaren vertikal angeordneten Fläche (Wand), dann wird diese im Kontaktbereich der Flamme entzündet, wobei die Zündung bevorzugt im Bereich der höchsten Flammentemperatur erfolgt. Dieser oberflächliche Abbrand einer senkrechten Materialfläche wird durch einen konvektiven Strom der heißen, gasförmigen und damit stark auftriebbehafeten Verbrennungsprodukte begleitet, was, wie vorgeannt, die weitere Brandausbreitung in vertikaler Richtung begünstigt.

Gleichermaßen ist auch eine Wärmeübertragung durch die Flammenstrahlung wirksam. Wesentlich ist dabei die Tatsache, dass Flächen aufbereitet werden können, die nicht durch den konvektiven Strom erreicht werden können. Die Wärmeleitung spielt eher eine untergeordnete Rolle. Aus dem Zusammenwirken der beiden Formen einer Wärmeübertragung entsteht oftmals eine Schadensbild, das trichterförmig nach oben aufgeweitet ist; dieses Schadensbild bezeichnet man häufig als (zweidimensionalen) Brandtrichter, in dessen Scheitelpunkt die Zündquelle bzw. das primäre Feuer zu lokalisieren ist.

Diese Spur wird in der Literatur auch als V-förmig beschrieben, wobei man gelegentlich auch Angaben zum Öffnungswinkel findet. Dieser Öffnungswinkel hängt von vielen Parametern ab und ist deshalb spezifisch für die Zündquelle bzw. für den Primärbrand und auch für das brennbare Material.

Noch besser geeignet erscheint das Bild einer vertikal angeordneten Parabel y

$$y = a \cdot x^2 .$$

Diese Parabel zeichnet sich dadurch aus, dass sie die

- bevorzugte Brandausdehnung in der Vertikalen,
- die reduzierte Ausdehnung in der Horizontalen und
- die geringe Ausdehnung in der Richtung nach unten

wiedergibt.

Im Brennpunkt der Parabel ($y = 1/4a$) ist der Ort der Brandentstehung festzulegen. Mathematisch bedeutet die Parabel, dass alle vom Brennpunkt ausgehenden Strahlen bei Reflexion an der Parabel parallel nach oben in die Vertikale abgelenkt werden, wie die aufsteigenden Heißgase (Parabel als geometrischer Ort). In diesem einfachen Parabelbild wird bei ungestörtem Abbrand, also ohne seitliche Zwangsbelüftung, die Konvektion

und Wärmestrahlung als Haupteffekt der Brandausweitung nach oben erfasst, aber auch die geringeren Strahlungsanteile zur Seite und in noch geringerem Maß nach unten.

Es ist realitätsnah, dass die Zündquelle bzw. der Primärbrand im dreidimensionalen Raum vorliegt. Das Schadensbild kann dann durch ein Rotationsparaboloid (Rotation der Parabel um die Vertikalachse) oder auch durch einen auf die Spitze gestellten Kreiskegel dargestellt werden. Beide räumliche Formen sind auch als dreidimensionale V-förmige begrenzte Schadensbilder aufzufassen. Im Fall des Paraboloids läge das primäre Brandzentrum im Brennpunkt. Auch diese Schadensspur wird als (dreidimensionaler) Brandtrichter bezeichnet.

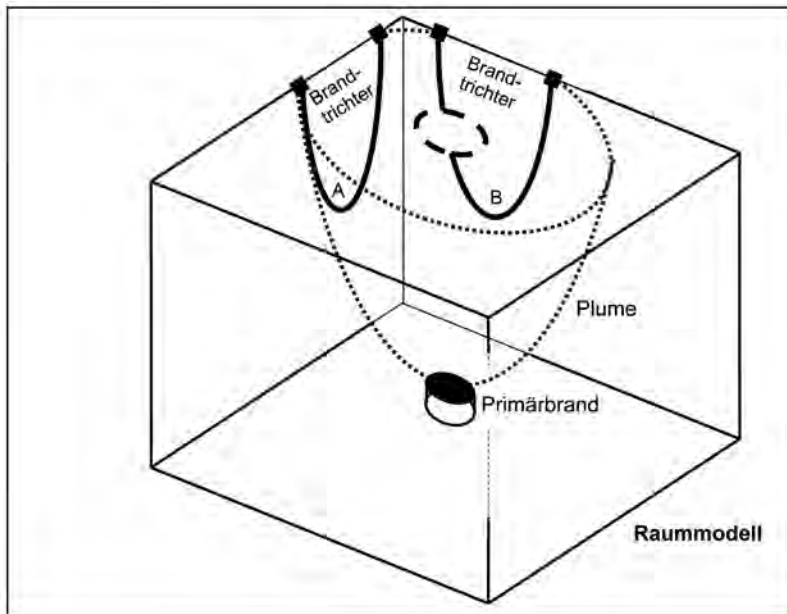


Abb. 1: Raummodell eines dreidimensionalen Brandtrichters mit parabolischen Schadensflächen an den Wänden (2-dimensionale Brandtrichter A und B)

Bei einem Raumbrand liegt daher ein charakteristisches Schadensbild vor, das in der Regel durch einen Brandtrichter beschreibbar ist. So kann an einer über einem primären Brandbereich angeordneten brennbaren horizontalen Fläche (z. B. Holzdecke) ein kreisrunder Schadensbereich entstehen, der als horizontale Schnittebene durch das Paraboloid zu verstehen ist. Das Zentrum dieses Schadensbildes gibt die Lage des Primärbrandes in der Ebene unter dieser Fläche an. An den brennbaren Seitenflächen, z. B. an der Wand, entsteht ebenfalls eine Schadensspur in Form einer flacheren Parabel, die als Vertikalschnitt durch das Paraboloid entsteht. Die Auswertung dieser Wandschäden lässt eine weitere Lokalisierung des Primärbrandes zu. Es ist daher möglich, aus dem Schadensbild das Paraboloid und damit die Lage des Primärbrandes zu rekonstruieren.

Da sich oberhalb des Brandtrichters eine Heißgasschicht im Brandraum ausbildet, kann sich, wenn es zu einer Zündung kommt, unter der Decke eine horizontale Brandausbreitung vollziehen, die die gesamte Decke als brandgeschädigt erscheinen lässt. Die Ausweitung der Brandfläche erfolgt dabei nach den Kriterien der horizontalen Brandausbreitung.

Wurde die gesamte Decke vom Brand erfasst, so erfolgt die Brandübertragung auf die oberen Bereiche der brennbaren Wände durch die heißen Rauchgase oder das in diesen Bereich hineinragende Inventar. Innerhalb der Heißgasschicht kann das zur Zerstörung des Erscheinungsbildes eines Brandtrichters führen.

Beim Bild des parabolischen Schadens ergibt sich auch trivialerweise, dass Gegenstände außerhalb des Schadens-Paraboloids oder der Schadens-Parabel als nicht vom Brand erfasst vorliegen, es sei denn, es erfolgte im Brandfortschritt ein Flashover. Andererseits ist nachvollziehbar, dass Gegenstände, die sich innerhalb des Brandtrichters befinden, in Brand geraten können und entsprechend deren Schnittflächen mit dem Brandtrichter eigene V-förmige oder parabolische Schadensspuren aufweisen.

Auch ist nahe liegend, dass es durch Raumöffnungen und meteorologische Einflüsse bedingte (Wind, Luftzug) Querströmungen sowohl beim zwei- wie dreidimensionalen Brandtrichter zu einer seitlichen Kippung des Brandtrichters kommen kann. Berücksichtigt man diese Verlagerung, dann lässt sich auch an den asymmetrischen Spuren auf den Brennpunkt der Parabel, d. h. auf die Lage des primären Brandes schließen.

Die Rekonstruktion des Brandtrichters oder der V-förmigen Brandzehrung ist als ein brandspezifisches Hilfsmittel zu sehen, das für den Rückschluss auf brennbare Stoffe, den Brandverlauf und die Brandentstehungsstelle wertvolle Erkenntnisse liefert.

2.6.2.4 Brandübertragung durch brennende Teilchen oder Gegenstände

Auch das brandbedingte Abfallen von brennbaren Teilen kann zu einem weiteren eigenständigen Brand führen, der bei geeigneter brennbarer Umgebung zur Bildung eines eigenen Brandtrichters führt. Hier ist eine Differentialdiagnose vorzunehmen, um den hierbei relevanten Verlauf einer zeitlich versetzten Brandübertragung darzustellen.

Liegt der Brandherd direkt an einer begrenzenden Wand, kann an der Wand infolge des Sauerstoffverbrauchs ein Unterdruck entstehen, der zur Annäherung der Flamme an die Wand führt (anschniegend). Darüber hinaus ist es durchaus möglich, dass in diesem Zusammenhang der für die Verbrennung erforderliche Sauerstoff nicht in ausreichendem Maße zur Verfügung steht und die Ausformung eines regulären Brandtrichters im Flammenbereich des Primärbrandes nicht erfolgt. Auch kann die nach unten gerichtete Brandausbreitung so gering sein, dass es zu keiner Inbrandsetzung z. B. einer hölzernen Sockelleiste kommt. So können z. B. Sockelleisten unverseht erscheinen, obwohl sie sich im Zentrum des primären Brandes befunden haben. Dieser Effekt wird in der englischen Fachliteratur mit dem aus der Meteorologie entlehnten Begriff „entrainment“ umschrieben.

2.6.2.5 Schichtungen des Brandschuttes

Im Verlauf der Entwicklung und Ausbreitung eines Brandes werden oberhalb des Fußbodenniveaus befindliche Bauwerksteile und Einrichtungsgegenstände sowie gelagerte Materialien hinsichtlich ihrer Lage bzw. Befestigung instabil. Teilweise werden sie zerstört und fallen zu Boden. Da sich dieser Vorgang in Abhängigkeit von der Zeit und der Intensität sowie der Richtung der Brandentwicklung vollzieht, entsteht am Brandort eine Schichtung, die Rückschlüsse auf die Brandausbreitung zulässt.

Als vereinfachte Regel kann gelten, dass das, was zuunterst liegt, zuerst der thermischen Belastung des Brandes nicht standhielt. Dabei müssen die Werkstoffeigenschaften der abgefallenen Gegenstände berücksichtigt werden.

Zwar stellt sich die schichtweise Beräumung des Brandortes als sehr aufwendig dar, doch kann wegen der vielfältigen Informationen nicht darauf verzichtet werden.

Darüber hinaus ist es für die Untersuchung der Brandentwicklung und Brandausbreitung im gesamten Brandraum unerlässlich, außer an der vermuteten Brandausbruchsstelle auch an anderen Stellen des Brandraumes die Schichtung zu Vergleichszwecken heranzuziehen. Dabei hat sich bewährt, die Untersuchungsfläche in Raster einzuteilen. Auf eine Verlagerung des Brandschuttes in ein noch nicht untersuchtes Rasterfeld muss vermieden werden.

2.6.2.6 Thermische Wirkungen

Jeder Brandraum weist gemessen am Brandspurenbild Zonen auf, in denen zum Teil extrem unterschiedliche Temperaturen geherrscht haben. Die dabei entstehenden thermisch bedingten Spuren sind für eine spätere Bewertung von Rauchgas- oder Heißgasströmungen sowie eine Abschätzung der Branddauer bedeutsam. Es handelt sich hierbei u. a. um:

- Verformungen an Metallen und Nichtmetallen (z. B. Kunststoffe),
- Schmelzspuren
- Putzabplatzungen
- Betonabplatzungen
- Mauerwerksverfärbungen
- thermische Wirkungen an Menschen und deren Kleidung

An Hand dieser Spuren lässt sich bei Kenntnis ihrer konkreten Lage im Brandraum, vor allem der Höhe über dem Boden, eine Existenz von Zonen gleicher oder ähnlicher Temperatur darstellen. Lage und Größe dieser Zonen gleicher oder ähnlicher Temperaturen hängen vor allem von der Strömung der Heißgase unter Berücksichtigung der Art der Brandlast, der Brandlastdichte, der Lage der Brandlast, der Raumgeometrie, der Lage und Größe der Raumöffnungen und weiteren Faktoren ab. Eine detailliertere Betrachtung des Sachverhaltes - thermische Wirkungen - erfolgt in Abschnitt 2.6.2.7.

2.6.2.7 Spuren an Werkstoffen

Während eines Brandes sind Werkstoffe einer thermischen Exposition ausgesetzt (Flammen, Wärmestrahlung), wodurch es zu Veränderungen grundlegender Eigenschaften wie u. a. der mechanischen Eigenschaften, der Gefügestrukturen, der Farbe u. a. kommen kann.

Daraus resultierende wesentliche Spuren an Werkstoffen können sein:

- Ausdehnung
- Deformation
- Anlauffarben
- Schmelzspuren
- Lichtbogenmerkmale
- Korrosionsspuren
- Schleifspuren
- Bruchspuren
- Spuren eines Metallabbrandes
- Gefügeveränderungen

Diese und weitere Spuren können in unmittelbarem Zusammenhang mit der Brandursache entstanden sein oder sind als in der weiteren Brandfolge entstanden zu betrachten.

Ausdehnung und Deformation

Infolge der Wärmebelastung dehnen sich Werkstoffe aus. Besonders bei langen Stahlträgern kann das dazu führen, dass die belasteten Träger das Mauerwerk an den Auflagern aus dem Verbund drücken bzw. Wände verschieben und zerstören. Bei größeren Hallen kann anhand dieses Merkmals auf die Stelle der höchsten thermischen Belastung geschlossen werden.

Werden Metallteile erwärmt, verlieren sie ihre mechanische Festigkeit und verformen sich, insbesondere unter Last. Der Vergleich zwischen verformten und unversehrten Teilen ergibt Hinweise auf die Stelle der höchsten Wärmebelastung. Bei Stahlkonstruktionen liegt die kritische Temperaturgrenze bei etwa $> 550\text{ °C}$.

Wenn die Wärme nur von einer Seite auf das Metall wirkt, dann stellt sich in Richtung der Wärmequelle eine konvexe Verformung ein; dabei ist zu beachten, dass mechanische Spannungen oder Belastungen im Material auch eine konkave Verformung hervorrufen können.

Dieser Effekt tritt zum Beispiel bei dünnen, aber fest eingespannten Blechen auf. Sind im Brandraum stehende geschlossene Behälter mit Flüssigkeiten oder Gasen gefüllt, können sich diese Behälter durch den entstehenden Binnendruck dehnen und unter Um-

ständen sogar aufreißen (Zerknall). Das schlagartig freigesetzte Füllgut kann, wenn es brennbar ist, zu einer explosionsartigen Brandintensivierung beitragen (z. B. Flüssiggasbehälter, Benzinkanister) oder aber zu mechanischen Zerstörungen bis hin zu einem lokalen Löscheffekt führen. Diesbezüglich ist auf das Phänomen des BLEVE (siehe Glossar) hinzuweisen.

Anlauffarben

Werden Metalle und insbesondere Stahl erwärmt, bilden sich Oxidschichten im Bereich von einigen μm aus, die zu Interferenzerscheinungen in Form von sogenannten Anlauffarben führen. Dies kann zur Abschätzung einer möglichen thermischen Belastung von Metallen im Brandfall genutzt werden, wobei aber darauf zu achten ist, dass eine längere thermische Exposition wie im Brandfall in der Regel zu Ausbildung von stärkeren Oxidationsschichten führt. Hierbei kann nicht zwingend von Anlauffarben ausgegangen werden. Der Vollständigkeit halber muss hinzugefügt werden, dass Anlauffarben auch bei der Oxydation von blanken Metallflächen bei Normaltemperatur entstehen können.

Bei der Wärmebehandlung von Stahl (z. B. Härten von Stahl) werden die entstandenen Farben dagegen als **Anlassfarben** bezeichnet.

Tab. 4: Übersicht zu Anlassfarben

(http://www.nibis.de/~auge/seiten/allgembild/technik/guv/guv_si_8038_metall.pdf)

Anlassfarbe	Temperatur in °C
hellgelb	180
strohgelb	220
dunkelgelb	230
gelbbraun	240
braunrot	250
purpurrot	260
violett	270
dunkelblau	280
kornblumenblau	290
hellblau	300
graublau	310
grau	320

In der Brandursachenermittlung können aus Verfärbungen in der Regel nur selten Schlüsse auf konkret vorhandene Temperaturen abgeleitet werden, aber als Hinweis auf eine vorhandene lokale Erwärmung, z. B. bei Reibungsschäden, gedeutet werden. Eine zeitliche Zuordnung ihrer Entstehung ist nicht möglich.

Anlauffarben können auch zur Bestimmung der Einwirkungsrichtung des Brandes herangezogen werden. Nur wenn durch andere Befunde eine Verfälschung ursprünglicher Anlauffarben weitestgehend auszuschließen ist, kann die festgestellte Spur zur Beweisführung hinsichtlich konkreter Temperaturen herangezogen werden.

Schmelzspuren

Eine Vielzahl von Feststoffen besitzt die Eigenschaft, bei höheren Temperaturen vom festen in den flüssigen Aggregatzustand überzugehen. Sie erreichen dann ihren Schmelzpunkt oder die Schmelztemperatur. Je nach Stoff können die Werte wenig über der Umgebungstemperatur (z. B. organische Stoffe wie Paraffine bei 40 bis 60 °C) über einige hundert Grad bei vielen Metallen (z. B. Aluminium 660,4 °C bzw. Eisen 1536 °C) bis zu einige tausend Grad (Wolfram 3422 °C) liegen. Im Brandfall tritt die Aufschmelzung von Metallteilen bei Überschreitung der Schmelztemperatur ein. Aussagen können bei derartigen Spuren in erster Linie hinsichtlich der erreichten Temperatur, aber auch bezüglich der Richtung der Wärmeeinwirkung bei einseitiger bzw. teilweiser Abschmelzung von Bauteilen getroffen werden. Stoffe, wie z. B. die natürlichen Fette, die aus mehreren Komponenten mit unterschiedlichen Molmassen bestehen, weisen keinen scharfen Schmelzpunkt sondern einen sogenannten Schmelzbereich auf. Auch die thermoplastischen Kunststoffe besitzen einen Schmelzbereich und zeigen ein entsprechendes Verhalten. Im Gegensatz dazu erweisen sich die duroplastischen Kunststoffe in nahezu allen Temperaturbereichen bis zu ihrer Zersetzungstemperatur als thermisch stabil und sind deshalb auch bis nahe an ihre Zersetzungstemperatur technisch einsetzbar. Im Gegensatz zu den Stoffen mit einem eindeutigen Schmelzpunkt erreichen Stoffe mit einem Schmelzbereich bei ihrer Erwärmung ihre Erweichungstemperatur. Niedriger als die Erweichungstemperatur liegt die Gebrauchstemperatur (auch Dauergebrauchstemperatur), wobei bis zu deren Erreichen in der Regel die Anwendung des jeweiligen Kunststoffes als technisches Produkt erfolgen kann. Einen Sonderfall im Bereich der Kunststoffe stellen die Elastomere dar. So weisen diese bei Normaltemperatur kautschukelastische Eigenschaften auf. Ein Schmelzen tritt bei höheren Temperaturen im Gegensatz zu den Thermoplasten nicht ein, wobei aber sogenannte thermoplastische Elastomeren ein Erweichungsverhalten zeigen. Eine weitere Temperaturerhöhung führt wie bei den Duroplasten ebenfalls zur Zersetzung. Sogenannte konventionelle Elastomere zersetzen sich ohne Erweichung bei höheren Temperaturen. Insofern sind nahezu ausschließlich bei den Thermoplasten über vorgefundene Schmelzspuren Rückschlüsse über mögliche Umgebungstemperaturen ableitbar. Vorgefundene Zersetzungsspuren bei Duroplasten und Elastomeren lassen aber Schlussfolgerungen zu möglichen Mindestumgebungstemperaturen zu. Wichtig in diesem Zusammenhang ist auch das Verhalten von Glas bei thermischer Exposition. Ähnlich wie bei den Thermoplasten führt eine thermische Exposition von Glas zu dessen allmählicher Erweichung. Diesen charakteristischen Bereich bezeichnet man als Transformationsbereich. Die vorgenannten Kunststoffe, die einen Schmelzbereich besitzen, und auch die Gläser besitzen bezüglich ihres strukturellen Aufbaus keine kristalline sondern eine amorphe Struktur, wenn man von teilkristallinen Strukturen bei einigen thermoplastischen Kunststoffen absieht (z. B. teilkristallines PP).

Korrosionsspuren

Unter Korrosion ist eine chemische oder eine elektrochemische Reaktion eines Werkstoffes mit Stoffen aus seiner Umgebung zu verstehen, wobei es zu messbaren Veränderungen am Werkstoff kommt (siehe Punkt 4.3.8.1). In bestimmten Fällen kommt es zu

einer Massenzunahme, wie z. B. bei einer der häufigsten Reaktion, der Sauerstoffkorrosion, in Form der Rostbildung an eisenhaltigen Werkstoffen wie Stahl. Im technischen Sinne wird Korrosion gemäß DIN EN ISO 8044 definiert: „Korrosion ist die Reaktion eines metallischen Werkstoffes mit seiner Umgebung, die eine messbare Veränderung des Werkstoffes bewirkt und zu einer Beeinträchtigung der Funktion eines metallischen Bauteils oder eines ganzen Systems führen kann. In den meisten Fällen ist die Reaktion elektrochemischer Natur, in einigen Fällen kann sie chemischer oder metallphysikalischer Natur sein.“

Die Norm definiert verschiedene Korrosionsarten. In Abhängigkeit von Werkstoff und Ort des Auftretens werden z. B. Kontaktkorrosion, Lochfraßkorrosion, Spannungsrisskorrosion, Schwingungsrisskorrosion, Erosionskorrosion, Unterwanderungskorrosion und Hochtemperaturkorrosion genannt. Im Zusammenhang mit der Brandursachenermittlung kommt es aber nicht nur darauf an, die relevante Korrosionserscheinung zu ermitteln. Vielmehr kommt es darauf an, die von einer Korrosionsform ausgehenden Wirkungen im Sinne eines primären Einflusses auf die Brandentstehung herauszuarbeiten bzw. die Korrosionsspuren eindeutig als sekundäre Folge des Brand- und/oder Löschprozesses zu verstehen.

Schleif- und Bruchspuren

Schleifspuren entstehen vor allem an aneinander reibenden Teilen. Bei Schleifvorgängen ist deshalb an den beteiligten Gegenständen bzw. technischen Einrichtungen (Reibungspartner) nach charakteristischen Spuren zu suchen (Riefen, Materialverfrachtung, Anlauffarben).

Schleifvorgänge können infolge der Ausbildung heißer bis glühender Abrieberscheinungen (Funken, Metallspäne u. ä.) sowie dem Erreichen zündfähiger Temperaturen an größeren Teilen wie Wellen, Lager u. a. als Zündquelle in Erscheinung treten – siehe Punkte 4.3.1 und 4.3.2. Durch Brüche von Bauteilen (z. B. Lagerbruch) kann es zu Störungen in technischen Geräten kommen, die wiederum brandauslösend wirken können.

Spuren eines Metallbrandes

Da bei einem Metallbrand sehr hohe Temperaturen auftreten, ist an entsprechenden Stellen mit einer intensiven, durch normale Brandwärme nicht erklärable Zerstörung zu rechnen. Solche Brände sind insbesondere bei Spänen und bei Bauteilen (Motorblock) aus Leichtmetallen wie z. B. Magnesium- und Aluminiumlegierungen zu beobachten.

Spuren an mineralischen Werkstoffen

Bedingt durch die aus einem Brand resultierende Wärmewirkung auf Bauwerksflächen, wie z. B. die Oberflächen von Betonwänden und Putzflächen, werden mechanische Spannungen hervorgerufen, die zum Abplatzen der mineralischen Werkstoffe führen. Maßgeblich hierfür sind die materialspezifischen Ausdehnungskoeffizienten, die den Widerspruch zwischen Intensität der thermischen Exposition und dem beschränkten thermischen Ausdehnungsvermögen der wärmebeaufschlagten Stoffe widerspiegeln. Kommt es nach einer thermischen Exposition mit schon teilweise eingetretenen Materialzerstörungen zu einer durch die Brandbekämpfung bedingten Exposition mit kaltem Löschwasser, führt das infolge einer spontanen Abkühlung von Bauwerksteilen teilweise zu noch zu stärkeren Zerstörungen an den betroffenen Bauteilen. So ist davon auszugehen, dass sich beim Auftreffen

von kaltem Löschwasser auf erwärmte Flächen (> 500 °C) ein mindest ähnliches Schadensbild wie vorgenannt zeigt. Auch hier lösen sich Putz- und Betonmaterial auf größeren Flächen ab. Es ist deshalb notwendig, in brandbedingte und löschwasserbedingte Abplatzungen zu unterscheiden.

Bei einem längerfristigen Temperaturniveau > 800 °Celsius führt das bei Mauersteinen, Putz, Beton und Sand auf deren Oberflächen zu Schmelzerscheinungen in Form von Verglasungen und zu partiellen Ausschmelzungen an derartigen Werkstoffen, insbesondere aber bei Glaswerkstoffen.

Brandbeschleunigungsmittel/Brandlegungsmittel

Alle brennbaren Flüssigkeiten oder Feststoffe können als Brandbeschleunigungsmittel wirken. Werden sie zum Zweck der Brandstiftung verwendet, bezeichnet man sie als Brandlegungsmittel (siehe Abschnitt 5.2)

Unter brandbeschleunigenden Mitteln sind im Rahmen der Branduntersuchung insbesondere leicht entflammable Stoffe bzw. Materialien zu verstehen, die bei Brandstiftungen verwendet werden. Geprüft werden muss in jedem Fall, ob Brandbeschleunigungsmittel bereits vor dem Brand an der Brandausbruchsstelle in Form von notwendigem Inventar oder Vorräten vorhanden waren. In der Praxis finden u. a. die nachfolgend aufgeführten Stoffe Verwendung als Brandbeschleunigungsmittel.

Tab. 5: Übersicht zu Brandbeschleunigern

feste Stoffe	flüssige Stoffe
– Paraffin- oder Stearinkerzen	– Ottokraftstoff
– Papier/Kartonagen	– Brennspritus
– Holz oder Holzspäne	– hochprozentige alkoholische Getränke
– Kohleanzünder	– Diesekraftstoff/Heizöl EL
– Räucherkerzen	– Farbverdünner verschiedenster Art
– Zündholzer in größeren Mengen	– Reinigungsmittel
– Chlorat-Zucker-Gemische	– Kerosin
– Pyrotechnische Gegenstände	– Petroleum
– Kunststoffe	– Klebstoffe

In Abhängigkeit von der Materialart und der Brandentwicklung verbrennen Feststoffe nicht immer vollständig oder rückstandsfrei. Besonders wenn sie als Brandbrücken oder an verschiedenen Zündstellen verwendet werden, können noch mehr oder weniger unverbrannte Reste sichergestellt werden.

Der Abbrand brennbarer Flüssigkeiten verursacht auf brennbaren Unterlagen flächenhafte, besonders auffällige lachenähnliche Einbrennspuren. Die Formen der Einbrennspuren lassen Rückschlüsse auf die Art des Ausbringens der Flüssigkeit zu (z. B. verspritzt

oder verschüttet, Richtung des Ausbringens). So können auch ausgedehnte Schütt- und Luntenspuren identifiziert werden.

Auf nichtsaugfähigen Untergründen, wie Beton bzw. Fliesen, verursachen flüssige Brandbeschleunigungsmittel aufgrund einer nur geringen Erwärmung des Untergrundes keine der Größe der ursprünglichen Flüssigkeitslache äquivalente Abplatzungen. Festgestellt werden aber oftmals Rußkondensate und kleine Anplatzungen gerade in Fugennähe. Bei leichtflüchtigen Flüssigkeiten ist meist von einem rückstandslosen Verbrennen auszugehen.

Bei mehr oder weniger saugfähigen Untergründen wie Holzfußböden, Erdreich, Textilien und Ähnlichem dringen diese Flüssigkeiten in die porösen Materialstrukturen ein, sie werden absorbiert. Weiterhin sammeln sich brennbare Flüssigkeiten in Ritzen, Fugen, unter Gegenständen, in Fußbodeneinläufen oder tiefer liegendem porösen Material und dort bleibt die ausgebrachte brennbare Flüssigkeit zum Teil auch nach dem Brand erhalten.

Bei rechtzeitiger und sachgemäßer Sicherung von verbleibenden Resten eines Brandlegungsmittels ist eine Stoffidentifizierung auf analytischem Wege (siehe Abschnitt 5) nicht nur möglich sondern zwingend angezeigt.

Zugangsmöglichkeiten

Die Untersuchung der Zugangsmöglichkeiten zu einem Brandobjekt (z. B. Türen, Fenster und alle anderen Öffnungen), durch die eine Person ins Gebäude eindringen kann und durch die geeignete Brandlegungsmittel oder entsprechende -vorrichtungen eingebracht werden, gehört zu den wesentlichen Aufgaben der Brandursachenermittlung. Nur die Besichtigung von Schlössern und Verschlüssen allein ist allerdings nicht ausreichend. Es ist erforderlich, dass in diesem Zusammenhang eine detaillierte Untersuchung dieser nichtbrandtypischen Spuren in Verbindung mit den brandtypischen Spuren erfolgt, um exakte Schlussfolgerungen über den Zustand von Türen, Toren und Fenstern sowie von Schlössern und Verschlüssen vor dem Brand ableiten zu können. Im Allgemeinen werden Türen, Fenster sowie die daran befindlichen Beschläge und Verschlüsse nach der Brandentstehung durch Personen nicht mehr verändert. Gegebenenfalls sind Experten für Form- und Werkzeugspuren einzuschalten. Durch die konzentrierte Einwirkung von Wärme und Rauchgasen sind Verschlusseinrichtungen Belastungen ausgesetzt, wodurch sich deren Form und die Lage ändern und spezielle Einbrennspuren und Rauchgasniederschläge entstehen können.

Dem Brand direkt ausgesetzte Bauteile werden thermisch beschädigt. Geschützte oder abgedeckte Teile grenzen sich deutlich von ungeschützten ab. Das trifft für Rußspuren an Schließriegeln ebenso wie für Ein- und Verbrennungen an Falzen von Türen und Fenstern mit Holzrahmen zu. Während bei geschlossenen Fenster- oder Türflügeln die Innenseiten der Falze oft noch gut erhalten sind, sind sie bei geöffnetem Flügel rußbelastet oder stark brandgeschädigt. Untersucht werden müssen deshalb immer Rahmen, Flügel und Falze, auch von Fenstern und Türen, die nach dem Brand geschlossen erscheinen.

Unabhängig von der Feststellung, dass ein Raum oder Gebäude vollständig ausgebrannt erscheint, ist es dennoch angezeigt, im Bereich von Türöffnungen den Brandschutt zu beräumen. Die Reste des unteren Türblattes gestatten die Rekonstruktion des vormaligen Öffnungszustandes, wenn der Brandschutt schichtenweise entfernt wird. Ist das Türblatt entfernt worden, so kann die Position des Türblattes ermittelt werden, wenn der Bodenbereich unter dem Türblatt weniger geschädigt als jener im Brandraum ist.

Aus der Lage von Schlössern, Schlüssel, Türbändern und Ähnlichem lassen sich ebenfalls wichtige Schlüsse ziehen. Derartige Teile fallen, wenn die brennbaren Türen, Tore und Fenster verbrannt sind, senkrecht nach unten. Liegt ein Türschloss direkt neben dem entsprechenden Türzargenrest, lässt dies auf eine geschlossene Tür schließen. Wird das Türschloss jedoch im Rauminnen mit einem erheblichen Abstand zum Türrahmen gefunden, lässt sich daraus schließen, dass die Tür während des Brandes offen stand. Dabei ist allerdings zu beachten, dass durch Einsturz, Teilabbrand oder Löscharbeiten ebenfalls Lageveränderungen hervorgerufen werden können.

Die Untersuchung der Reste von Fensterscheiben kann zu wichtigen, den Brandverlauf charakterisierenden Hinweisen führen. Festzuhalten sind die Form der Scherbenreste sowie vorhandene Rauchgasniederschläge. Die an den Scheibenresten nachweisbaren Bruchspuren, die z. B. durch die Einwirkung von Gewalt oder durch den Explosionsdruck (siehe Glossar) hervorgerufen wurden, unterscheiden sich signifikant in ihrer Rissbildung von solchen, die durch Wärmeeinwirkung entstehen.

Sind die im Brandschutt zuunterst liegenden Scherben von Einfachverglasungen nicht beruht, wurde die Scheibe möglicherweise vor dem Brand eingeschlagen und eine der Form entsprechende Russaussparung an der Unterlage erzeugt. Liegen Glasscheiben mit einseitiger Beruftung und/oder Wärmesprüngen im oder auf dem Brandschutt, war deren Zerstörung eine Folge des Brandes.

Die Bruchkanten der Scherben geben Aufschluss über den Zerstörungsmechanismus (Wallner-Linien, Schlagnarben, Rissverzweigung, Bruchbild); hier sind die Scherben der Beurteilung eines Spezialisten für Formspuren zuzuführen.

Vergleichsobjekte und Vergleichsmaterial

Grundsätzlich wird das Vergleichsmaterial von der Spurenart und der Zielstellung der Vergleichsuntersuchung bestimmt. Zu den Vergleichsmaterialien zählen auch vom Ereignisablauf nicht beeinflusste, jedoch relevante Materialproben (Blindproben). Diese Blindproben können wesentliche Informationen für eine eindeutige Ergebnisinterpretation bieten.

Unabhängig von der Art des Vergleichsmaterials ist grundsätzlich zu beachten, dass das Vergleichsmaterial authentisch und ausreichend zur Verfügung stehen muss. Für die Sicherung von Vergleichsmaterialien gelten die gleichen Anforderungen wie für die Sicherung einer Spur. Nur dadurch ist eine Spurenübertragung auszuschließen.

Um einen Vergleich durchführen zu können, müssen mögliche Einflüsse im Zusammenhang mit der Spurenentstehung bis hin zur Spurensicherung und Untersuchung der Spur berücksichtigt werden.

In jedem Fall ist zu prüfen, ob und in welchen Umfang Vergleichsmaterialien in die Untersuchungen einbezogen werden müssen. Bei laboranalytischen Untersuchungen kommt dem Vergleichsmaterial eine besondere Bedeutung zu.

Tab. 6: Beispiele zu möglichen Vergleichsmaterialien

nicht brandtypische Vergleichsmaterialien	brandtypische Vergleichsmaterialien
Bestimmung des Verursachers <ul style="list-style-type: none"> – Schuhe – Werkzeuge – Waffen – Stempel Teile des Spurenverursachers <ul style="list-style-type: none"> – Blutproben – Haarproben – Bodenproben – Textilien – Urin, Körpersekrete (DNA) 	Bestimmung der Zusammengehörigkeit <ul style="list-style-type: none"> – Bruchstücke – Schnittstücke – Rissstücke – Passspuren – Wallnerlinien – Bruchbild Teile des Spurenträgers Baustoffe und Materialien <ul style="list-style-type: none"> – Flüssigkeiten in Sammlungen – erfasste Spektren und Chromatogramme

2.6.3 Spurensuche mit dem Photoionisationsdetektor – PID

Zur Unterstützung der Suche nach brandfördernden Substanzen, die unter Umgebungsbedingungen u. a. in Dampfform vorliegen, können mobile Detektionsgeräte (engl. *Sniffer*) verwendet werden, um Rückstandskomponenten brennbarer Flüssigkeiten festzustellen. Am häufigsten werden zur Spurensuche Photoionisationsdetektoren eingesetzt (siehe auch Kapitel 5).

Die Anwendung des Photoionisationsdetektors kann durch externe Störungen, die sich nachteilig auf den Detektor auswirken können, erschwert werden. Insbesondere eine hohe Luftfeuchtigkeit, Wasserdampf sowie Staub können zu einer Herabsetzung der Empfindlichkeit und damit zu einer Abnahme des Anzeigewertes führen.

Die gerätebedingten Einsatzbeschränkungen und die unbekanntenen Eigenschaften des Brandbeschleunigungsmittels bestimmen die Anwendung des PID. So ist in den überwiegenden Fällen eine Anwendung des Photoionisationsdetektors nur zum Abscannen der Oberfläche des Brandschuttes nicht sinnvoll. Die relevanten Brandbereiche und das zu untersuchende Material müssen sachgerecht schichtenweise freigelegt werden, um ein notwendiges Abdampfen des Brandbeschleunigungsmittels zu ermöglichen. Dabei lassen sich selbst bei größter Vorsicht eine Staubentwicklung und/oder der Einfluss durch den vom vorhandenen Löschwasser verursachten Wasserdampf nicht vermeiden.

Der Photoionisationsdetektor sollte stets ohne eine direkte Berührung des Brandschuttes, aber so dicht wie möglich an das Untersuchungsmaterial herangeführt werden. Das Ansaugen der Dämpfe und die PID-Auswertung dauern bis zur Anzeige teilweise mehrere Sekunden. Wird der Photoionisationsdetektor daher zu schnell über das Untersuchungsmaterial geführt, kann unter Umständen die benötigte Ansaugmenge für die Auswertung nicht ausreichen.

Müssen große Brandflächen geprüft werden, ist mit einem entsprechend sehr hohen Zeitaufwand zu rechnen.

Niedrige Umgebungstemperaturen bedingen einen niedrigen Dampfdruck einer Vielzahl brennbarer Flüssigkeiten. Dadurch werden z. B. bei Frosttemperaturen zu geringere Volumina relevanter Substanzen vom Photoionisationsdetektor angesaugt, so dass bei quantitativer Betrachtung ein niedriges Ergebnis eine scheinbar geringe Konzentration vortäuscht. In Einzelfällen kann eine Erwärmung des entnommenen Untersuchungsmaterials zu einer Erhöhung des PID-Signals führen. Möglicherweise ist dann das Untersuchungsmaterial als Spur für eine weiterführende analytische Untersuchung nicht mehr optimal, so dass hierfür eine weitere Probe zu sichern ist.

Im Brandschutt befinden sich immer Reste nicht vollständig verbrannter Materialien. Diese Stoffe können auch noch nach dem Ablöschen des Brandes in geringer Menge unverbrannte Pyrolyseprodukte freisetzen. Insbesondere die flüchtigen Pyrolyseprodukte von Kunststoffen, bituminösen Baustoffen, alkoholhaltigen Reinigungsmitteln sowie Klebstoffen werden ebenfalls detektiert und können allein auf der Grundlage eines PID-Scan zu Fehlschlüssen hinsichtlich eines möglichen Ergebnisses bzw. zu Fehlern bei der Festlegung von Probenahmen führen. Aus dem PID-Signal kann allein auf der Grundlage einer Summenmessung aller angesaugten Substanzen nicht abgeleitet werden, welche konkreten Substanzrückstände sich im Brandschutt befinden. Insoweit ist das Messverfahren des PID als substanzunspezifisch zu bewerten.

Verhältnismäßig eindeutig können hingegen Konzentrationsunterschiede in dem zu untersuchenden Brandbereichen durch die relativen PID-Signale festgestellt werden. Hierbei gilt aber stets die verändernde Wirkung des Abbrandes zu berücksichtigen, so dass keine quantitativen Schlüsse gezogen werden sollten.

Die Anwendung des PID besitzt letztendlich nur Vorprobencharakter und ersetzt nicht den analytischen Nachweis im Labor. Bei großflächigen Objekten ist eine Absuche des Brandschuttes nur stichprobenartig möglich und daher meist unvollständig bzw. zufällig. Es sollte deshalb in diesem Zusammenhang der Einsatz eines Brandmittelspürhundes überdacht werden (siehe Abschnitt 2.6.4).

2.6.4 Brandmittelspürhunde

Der äußerst empfindliche Geruchssinn des Hundes ist dem Menschen seit Langem bekannt. Seit Jahrhunderten dient der Hund dem Menschen bei der Jagd und insbesondere zum Apportieren der erlegten Beute.

Weltweit nutzen die unterschiedlichsten Organisationen und Institutionen das Geruchsvermögen des Hundes als so genannte Spürhunde, z. B. für die Suche nach verschütteten Menschen oder verborgenen Leichen. Das Aufgabenspektrum der Spürhunde hat sich in den letzten Jahren erheblich erweitert. In der polizeilichen Arbeit oder beim Zoll werden Spürhunde neben der Suche nach Drogen, Waffen und Sprengstoff mittlerweile auch zum Aufspüren von beispielsweise Bargeld sowie von Tabak oder anderen behördlich beschränkten Waren eingesetzt.

Resultierend aus dieser Kenntnis der unterschiedlichen Einsatzmöglichkeiten von Spürhunden wurden Mitte der 80er Jahre erstmals in den USA Brandmittelspürhunde (BMSH) ausgebildet und nach den positiven Ergebnissen landesweit eingesetzt. In Deutschland wurde zu dieser Zeit die Ausbildung von BMSH sehr kritisch betrachtet und ein Bedarf nicht erkannt oder sein Einsatz als nicht zielführend erachtet. So dauerte es noch bis zum Juli 1997, bis die ersten zwei Hunde als BMSH eingesetzt werden konnten.

Wie bei allen Spürhunden basieren die Ausbildung und das Training der BMSH auf dem den Hunden angeborenen Spiel- und Beutetrieb. Bei Übungen mit einem Spielzeug (Kunststoffrohr, Tennisball oder ähnlichem Hohlkörper) lernt der Hund den jeweiligen Geruch seines Spielzeugs kennen. Zusätzlich wird auf oder in den Hohlkörper eine geringe, im Verlauf des Trainings abnehmende Menge der brennbaren Flüssigkeit, auf die er konditioniert werden soll, ein- bzw. aufgebracht.

Durch regelmäßiges Training verbindet der Hund dann nach und nach die Suche nach seinem Spielzeug mit dem Geruch der Flüssigkeit. Er sucht in Wirklichkeit sein Spielzeug, folgt aber dem Geruch der jeweiligen Substanz. Diese Vorgehensweise wird dann für jede zu trainierende Flüssigkeit wiederholt.

Hat er den Ort seines vermeintlichen Spielzeugs gefunden, soll er dies durch ein passives Anzeigen (Ablegen) indizieren. Dieses passive Anzeigen verhindert im Einsatz eine Zerstörung des unmittelbaren Brandbereiches und erleichtert die Probenentnahme für die nachfolgende Laboruntersuchung.

Die weitere spezielle Ausbildung gliedert sich in mehrere Teilschritte. Diese Schritte werden für jede zu konditionierende brennbare Flüssigkeit wiederholt. Im nächsten Ausbildungsschritt werden in real gestellten Suchsituationen die aufzuspürenden brennbaren Flüssigkeiten in geringsten Mengen ausgebracht. Hat der Hund diesen Teil der Ausbildung absolviert, wird in der letzten Phase die Konditionierung an realen Brandorten vorgenommen. Wegen der hohen Detektionsfähigkeit der BMSH hinsichtlich der Erkennung von Brandbeschleunigerspuren ist deren Nachweisgrenze deutlich niedriger als die der analytischen Verfahren.

Die Pyrolyseprodukte können das Anzeigeverhalten beeinflussen, insbesondere wenn am Ereignisort keine Brandbeschleunigungsmittel vorhanden sind. Diese vermeintliche Fehlanzeige ist nicht zu verhindern. Die Entscheidung, ob es sich tatsächlich um Pyrolyseprodukte handelt, kann nur durch analytische Untersuchungen getroffen werden.

Besonders große, unübersichtliche oder schwer zugängliche Brandorte können mit den BMSH schnell, zuverlässig und vor allem flächendeckend abgesucht werden. Auch nicht

zugängliche Hohlräume kann der Hund überprüfen. Der BMSH ist uneingeschränkt ein wirksames Einsatzmittel.

2.6.5 Probenentnahme, Spurensicherung

Der Begriff Asservat (amtlich: Verwahrstück) bezeichnet einen nach Polizeirecht und nach der Strafprozessordnung sichergestellten oder beschlagnahmten Gegenstand. Die Tätigkeit der Sicherstellung oder Beschlagnahme wird als Asservieren bezeichnet. Sie erfolgt in der Regel durch Übergabe des Beweismittels an den Sachverständigen, den Polizeibeamten oder den Vertretern der Versicherungen.

Erfolgt keine freiwillige Herausgabe eines Beweismittels, können diese polizei- und strafprozessrechtlich gegen den Willen des Besitzers beschlagnahmt werden; das ist ein staatlicher Hoheitsakt zur Sicherung öffentlicher Belange, der als Beschlagnahme bezeichnet wird. Auf die Vorschriften der Strafprozessordnung wird verwiesen.

Im Strafprozess können beschlagnahmt werden:

- Gegenstände, die als Beweismittel für die Untersuchung von Bedeutung sein können, wenn sie nicht freiwillig herausgegeben werden
- Gegenstände, bei denen Gründe für die Annahme bestehen, dass sie dem Verfall oder der Einziehung unterliegen

Werden die Gegenstände freiwillig herausgegeben, genügt eine formlose Sicherstellung. In allen Fällen ist ein Sicherstellungsverzeichnis zu erstellen und unterschreiben zu lassen.

Bei der Untersuchung eines Brandortes werden naturgemäß eine Vielzahl von materiellen Erscheinungsformen (Spuren) gesichert, entnommen und ausgewertet. Dabei sind die Spuren immer auf der Grundlage der Anforderungen des Sachbeweises zu sichern. In der Folge der Untersuchung kommt es darauf an, die Spuren so zu sichern, dass sie als objektive Beweismittel gewertet werden können. Eine voreilige Schlussfolgerung zur Entstehung des Brandes, die nur auf der Grundlage von einzelnen Spuren vorgenommen wird, muss insbesondere bei einer komplexen Spurenlage vermieden werden.

Vielmehr hat eine umfassende Prüfung aller relevanten Fakten zur Feststellung der Brandursache nach dem Grundsatz der Kausalität zu erfolgen.

Dabei müssen die am Brandort gesicherten Spuren nachvollziehbar der gerichtsfesten Beweisführung dienen. Sie sind hinsichtlich

- der Feststellung des Brandverlaufes
- der Brandursache
- einer möglichen Brandgefährdung
- der Spiegelung des Handlungsablaufes eines Täters

von außerordentlicher prozessrechtlicher Bedeutung.

Eine exakte, gründliche, reproduzierbare und unvoreingenommene Sicherung der Spuren ist Voraussetzung für alle Untersuchungen. Diese Forderungen müssen unabhängig von der Größe oder der Bedeutung des Ereignisortes eingehalten werden.

Dies ist notwendig, um zweifelsfreie Aussagen zur Entstehung, Identität, Funktion und Bedeutung der Spur eindeutig treffen zu können.

Alle Spuren, die für die Beweisführung Bedeutung erlangen können, müssen im Brandort- oder Tatortbefundsbericht (TO- Befundsbericht) protokolliert werden.

Dazu gehören auch die Spuren und sachlichen Beweismittel, die noch der weiteren Auswertung und Untersuchung bedürfen. Die anzuwendenden Sicherungsmittel und Sicherungsmethoden müssen eindeutig sein, dürfen keine Fälschung zulassen, müssen dauerhaft und nachvollziehbar überprüft werden können. Soweit ein Labormanagementsystem vorhanden ist, muss dort jede Spur erfasst werden.

Bei der Sicherung und Verpackung (Asservierung) von Spuren ist Folgendes zu beachten:

- Kennzeichnung, z. B. mittels fortlaufender Nummerntafel
- Beschreibung der Lage und des sichtbaren Erscheinungsbildes
- Zustand der Spur und der Umgebung bezüglich Einflussgrößen
- Vermessen und Skizzieren des Spurenbildes
- fotografische Sicherung in Übersicht und im Detail – mit Maßstab
- Verpackung gesicherter Spuren nach spezifischen Vorgaben
- eindeutige und dauerhafte Beschriftung des Verpackungsmaterials
- Protokollierung der Sicherung und Verpackung

Beim Transport der Spuren ist sicherzustellen, dass keine Beschädigungen bzw. Veränderungen eintreten. Grundsätzlich sind für den Transport der Gegenstände oder Substanzen geeignete Verpackungsmaterialien zu verwenden. Auch hinsichtlich der Lagerung der Spuren sind bis zur weiteren Untersuchung geeignete Bedingungen zu realisieren. Bei zu erwartenden chemischen, physikalischen bzw. biologischen Veränderungen sollte eine baldmöglichste Untersuchung angestrebt oder ein geeignetes Konservierungsverfahren gewählt werden. Bei der Übergabe empfindlicher Asservate ist auf die Gefahr des Untergangs des Beweismittels hinzuweisen und der Hinweis zu dokumentieren.

Die gesicherten Spuren dürfen nicht mit anderen Spuren und Vergleichsmaterialien zusammengebracht bzw. gemeinsam verpackt werden, weil durch eine nicht auszuschließende Spurenübertragung die Auswertung nicht nur erschwert sondern z. T. unmöglich wird.

Werden Spuren oder Vergleichsmaterialien schon am Brandort eingehender untersucht, kann dies einerseits rasch zu verwertbaren Ergebnissen führen; es besteht aber andererseits die Gefahr der Minderung der Wertigkeit, so dass das Beweismittel in Frage gestellt werden kann. Zur Bewahrung der Spuren bzw. der Vergleichsmaterialien vor Veränderungen oder einer Vernichtung ist die Sicherungsmethode anzuwenden, die eine Unversehrtheit garantiert.

Die Spuren dürfen nur einer fachkundigen und in der Sache berechtigten Person zugänglich sein, deren Name festzuhalten ist. Das Datum der Übergabe und die Dauer des Besitzes sind aktenkundig zu machen.

Unbefugten Personen ist es untersagt, Spuren oder Vergleichsmaterialien zu untersuchen, zu verpacken oder zu beschriften. Die berechtigten Personen, die eine Sicherung der Spuren und Vergleichsmaterialien vornehmen, müssen konsequent darauf achten, dass bei diesen Arbeiten keinerlei Spurenübertragung erfolgt, wie z. B. durch ihre Bekleidung, das verwendete Werkzeug, Sekrete und mangelhafte Verpackungen. Die Verschleppung von Materialien bzw. Substanzen aus anderen Räumlichkeiten oder Ereignisorten ist zuverlässig zu verhindern. Sind zur Sicherung von Spuren und Vergleichsmaterialien Demontagen an Gebäudeteilen, Maschinen oder Anlagen notwendig, muss der dazu notwendige Arbeitsablauf fotografisch oder per Video dokumentiert werden.

Unabhängig von der Größe und dem Ausmaß des Ereignisses sowie der Anzahl der gesicherten Spuren und Vergleichsmaterialien ist es generell erforderlich, einen aussagefähigen Bericht (Spurensicherungsbericht) anzufertigen.

Dieser Bericht sollte über folgende Mindestinhalte Auskunft geben:

- Ort und Zeitpunkt des Ereignisses
- Angaben zum Geschädigten
- Angaben zum Sachverhalt
- die Vorgangsnummer
- Benennung aller gesicherten Spuren und Vergleichsmaterialien, übereinstimmend mit der Kennzeichnung und Beschriftung am Verpackungsmaterial
- Angaben, wo, womit, wann und durch wen die Probenentnahme/Spurensicherung erfolgte
- Zuordnung von Spur und Vergleichsmaterial
- Verbleib der Spuren und des Vergleichsmaterials
- Untersuchungsziel
- Weitere Maßnahmen und Untersuchungen

Verpackungsmaterialien für Brandbeschleunigungsmittel müssen gasdicht, dampfdicht und mechanisch stabil sein. Deshalb erfüllen einfache Kunststofffolien und -behälter nicht die Anforderungen an eine Dichtheit im vorgenannten Sinne. Wurden dennoch

derartige Materialien verwendet, ist sofort eine Umverpackung vorzunehmen und zu dokumentieren. Generell ist eine Wiederverwendung der benutzten Verpackungsmaterialien nicht zulässig, d. h. es sind nur Einwegverpackungen zu verwenden.

In Fällen, bei denen unklare Aussagen zur Eignung des Verpackungsmaterials vorliegen, aber eine Verwendung erfolgte, ist vorsorglich eine Blindprobe des Materials (Spurensicherungsmittels) zu sichern, um im Labor die Eignung (Neutralität) der Verpackung beweisen zu können.

Allgemein gilt:

- keine Doppelverpackung der Brandasservate
- keine Flüssigkeiten in Mehrschichtfolientüten
- Glasflaschen nicht mit Kunststoff- oder Korkstopfen verschließen
- Gegenstände, die für eine mögliche molekulargenetische (DNA) bzw. daktyloskopische Untersuchung bestimmt sind, schützen
- Neutralproben entnehmen

Bei der Sicherung von DNA-Proben ist die Verwendung von Handschuhen, von Mundschutz und Haarschutz zwingend angezeigt.

Bei der Sicherung daktyloskopischer Spuren ist die Übertragung der eigenen Fingerspuren zu vermeiden.

Für beide Verfahren existieren spezielle Handlungsanleitungen.

2.6.6 Brandspuren an lebenden Personen

Bei der Spurensuche an lebenden Personen ist besonders auf Ansengungen an Körperhaaren, Kopfharen, Wimpern und Brauen zu achten und im Verdachtsfall sind mehrere Haare sicherzustellen. Weiterhin können Brandverletzungen, wie beispielsweise Rötungen oder Blasenbildungen an Fingern, Händen und dem Gesicht vorhanden sein. Hautdefekte sind immer einer medizinischen Untersuchung zuzuführen.

Die Bekleidung der Person ist nach Brandflecken, Seng- und Schmelzspuren, Ruß- oder Ascheanhaftungen zu untersuchen.

Besteht der Verdacht des Umgangs mit brennbaren Flüssigkeiten sind Anhaftungen an der Bekleidung und an den Schuhen zu erwarten. Gleiches gilt für mit Flüssigkeitsresten benetzte Hände oder andere Körperpartien. Zur Spurensicherung sollte ein Abtupfen der Haut mittels steriler Wattestäbchen (keine Kosmetik-Wattestäbchen, vorzugsweise DNA-Wattestäbchen) erfolgen. Durch Überstülpen von Latex- Handschuhen kann der kontaminierte Handschweiß nach einer gewissen Verweilzeit (ca. 30 min) auf der Innenfläche der Handschuhe gesichert werden.

Besteht der Verdacht, dass eine Inbrandsetzung mittels eines festen Brandlegungsmittels, wie z. B. Kohlenanzünder, erfolgte, sind die Taschen der Bekleidung und die mitgeführten Behältnisse nach Resten des Brandlegungsmittels zu kontrollieren. Bruchflächen an den Brandlegungsmitteln können für einen Passspurenvergleich herangezogen werden.

Die an Personen und der Bekleidung festgestellten Brandspuren sind fotografisch sowie durch eine Skizze zu dokumentieren.

2.6.7 Brandspuren an Leichen

Sind infolge eines Brandes Personen zu Tode gekommen, muss neben dem eigentlichen Brandereignis ein unnatürlicher Todesfall untersucht werden.

Unabhängig davon, ob die Brandortuntersuchung durch einen Kriminaltechniker, einen polizeilichen Brandsachverständigen oder einen öffentlich bestellten und vereidigten Sachverständigen durchgeführt wird, liegt bei einem unnatürlichen Todesfall die Verantwortung für die Untersuchung immer bei der Staatsanwaltschaft in Verbindung mit der für die Ermittlungen zuständigen Kriminalpolizei.

Weiterhin wird in der Regel ein Rechtsmediziner mit der Beurteilung der Todesursache beauftragt. Eine abgestimmte Zusammenarbeit aller Beteiligten ist notwendig und sinnvoll. Dabei können kausale Zusammenhänge von Brandentstehung, Brandverlauf und Tod des Menschen sachkundig beurteilt werden. Insbesondere ist zu klären, ob beispielsweise lebenswichtige Funktionen des menschlichen Organismus durch die Einwirkung des Brandes nachhaltig beeinträchtigt bzw. gänzlich gestört wurden oder der schon leblose Körper dem Brand ausgesetzt war.

Dementsprechend umfassen die Untersuchungen alle Maßnahmen zur Bestimmung des Brandverlaufes, des vermutlichen Verhaltens der Person während des Brandes und deren Endlage sowie der Ursachen für die Verletzungen und den Tod.

Die Lichtbilder von der Lage des Leichnams sind mit Detailaufnahmen des gesamten Körpers und des Aufliegebereiches zu ergänzen. Weiterhin sind die Lage der Leiche und deren Position im Raum sowie die Richtung der Brandeinwirkung auf die Leiche darzustellen.

Am Brandort sind alle Spuren zu sichern, die an der Leiche und deren Umgebung durch eine Lageveränderung oder eine Bergung hervorgerufen wurden. Wurden bei diesen Handlungen Spuren verändert oder gänzlich zerstört, ist dies ebenfalls zu dokumentieren. Dazu gehören z. B. Spuren, die auf eine Brandlegung hinweisen bzw. aufliegende oder auffällige Gegenstände in der Nähe der Leiche. Werden Kleidungsstücke gesichert, sind alle Einzelteile grundsätzlich getrennt und verdunstungssicher zu verpacken. Sie sind umgehend einer analytischen Untersuchung zuzuführen (siehe Punkt 5).

Ist eine Leiche vollständig mit Brandschutt bedeckt, so ist neben der schichtweisen Abtragung des Brandschuttes und der Dokumentation der Auffindungssituation auf Verlet-

zungen am Leichnam, die durch äußere Einwirkungen verursacht wurden, zu achten. Diese sind ebenfalls zu dokumentieren.

So können Erscheinungsformen wie Fechterstellung, Hautaufreißen, Schädelsprennungen, Brandhämatome u. a. auf Hitzeeinwirkung zurückgeführt werden. Sie belegen aber nicht den Tod durch diese. Rußeintrag in die Atemwege sind wichtige Zeichen der Vitalität zum Zeitpunkt des Brandes. Bei einem verpuffungsartigen Abbrand kann der Tod durch einen Hitzeschock eintreten, wobei Inhalationsspuren fehlen können.

Auch ist bei der Untersuchung und Dokumentation aller Körperteile nach lokalen Brandeinwirkungen auf Anhaftungen an der Leichenhaut zu achten. Dies gilt ebenfalls für durch Schutzreflex entstandene Faltenspurten (Krähenfußbildung) in den Augenwinkel.

Brände werden auch zur Verschleierung anderer Straftaten gelegt (Verdeckungsbrand). Aus diesem Grund sind die an Leichen festgestellten Brandspuren immer hinsichtlich der Verschleierung oder Verdeckung einer Körperverletzung oder einer Tötung zu werten.

Hinsichtlich der Todesursache kann bei Brandleichen neben Unfällen oder Gewalteinwirkung auch eine Selbsttötung nie ausgeschlossen werden. Zur Identifikation müssen erkennungsdienstliche Maßnahmen eingeleitet werden. Gegebenenfalls kann mit Hilfe des Zahnschemas, der Fingerspuren oder der molekulargenetischen Untersuchung die Identität festgestellt werden. Die Anordnung der gerichtlichen Leichenöffnung (Sektion, Obduktion) ist über die Staatsanwaltschaft oder einen Richter zu beantragen.

2.6.8 Experteninformationen

Im Zusammenhang mit Brand- und Explosionsereignissen in komplexen technischen Einrichtungen der verarbeitenden Industrie, in chemischen Betrieben, Forschungsinstituten, EDV-Anlagen usw. ist es oftmals notwendig, Experteninformationen aus den entsprechenden Fachbereichen einzuholen. Dieses Erfordernis besteht auch, wenn wirtschaftliche Hintergründe einen möglichen Zusammenhang zur Brand- oder Explosionsursache erkennen lassen. In jedem Fall erwächst die Notwendigkeit für eine Zusammenarbeit mit Experten aus den konkreten Erfordernissen der speziell notwendigen Begutachtung.

Als mögliche behördliche Experten kommen Mitarbeiter von Gewerbeaufsichtsamtern, Bauaufsichtsbehörden oder Umweltfachbehörden u. a. in Frage, aber auch Fachleute der Berufsgenossenschaften. Dabei können im Vorfeld ausgesprochene Auflagen für einen sicheren Betrieb der Anlage an den Betreiber sowie deren Realisierung insbesondere dann eine Rolle spielen, wenn die Auflagen nicht umgesetzt wurden und dies sich begünstigend auf die Entstehung des Ereignisses ausgewirkt haben kann.

Weiterhin kann die Prüfung der Einhaltung entsprechender Normen, Unfallverhütungsvorschriften oder betrieblicher Anweisungen aussagefähige Hinweise über die Ursache des Brandes und zum allgemeinen betrieblichen Sicherheitsniveau ergeben. Die Notwendigkeit von Zuarbeiten von Experten kann sich aber auch hinsichtlich der Standsicherheit oder der Begehbarkeit des Objektes (Statik) und des Gesundheitsschutzes

ergeben. Informationen können auch Sicherheitsbeauftragte und Fachkräfte für Arbeitssicherheit liefern, doch ist hierbei dem Umstand Rechnung zu tragen, dass es sich hierbei um Unternehmensmitarbeiter handelt.

Die Aufgaben für einen technischen Experten können sich beispielsweise auf folgende Bereiche erstrecken:

- Technische Anlagen der Strom- und Gasversorgung
- technologische Abläufe
- strömungsmechanische Gegebenheiten
- Lüftungsanlagen
- Klimaanlage
- Einbruchsmeldeanlagen
- Brandmelde- und Löschanlagen
- Baukonstruktion
- Feuerwiderstand
- Temperatur-Zeit-Entwicklungen
- Materialuntersuchungen
- Bestimmung brandtechnischer Kennwerte

Die Angaben dieser Experten sind stets auf ihre Plausibilität zu überprüfen, z. B. durch die Aushändigung entsprechender technischer Unterlagen.

2.7 Eigensicherung/Arbeitsschutz

2.7.1 Arbeitsschutz

2.7.1.1 Situation an der Brandstelle

Während des Brandes ist mit der Freisetzung zahlreicher flüchtiger Schadstoffe zu rechnen, insbesondere wenn eine unvollständige Verbrennung vorliegt (siehe auch Abschnitt 1.5.8.2). Brandstellen werden wegen der Vielzahl von Einzelkomponenten salopp als „explodierte Apotheke“ oder „Giftcocktail“ bezeichnet.

Während des Brandes und auch in seiner Abklingphase werden bei ungeschütztem Aufenthalt in minderventilierten Räumen und in der Rauchgaswolke erhebliche und damit nicht tolerierbare Beeinträchtigungen festgestellt, wie

- Schleimhautreizungen
- Schwindel

- Benommenheit
- Kopfschmerz
- Atemstörungen
- Krämpfe
- Augenverätzungen
- Bewusstlosigkeit
- Intoxikation

Ohne spezifische Schutzausrüstung muss daher den Brandermittlern und den Brandsachverständigen das Arbeiten im Brandobjekt verwehrt werden.

2.7.1.2 Gesetze, Richtlinien, Verordnungen

Die europäische Arbeitsmittelbenutzungsrichtlinien und die Normen EN enthalten Mindestanforderungen und führten auf nationaler Ebene zum Erlass des *Arbeitsschutzgesetzes* (ArbSchG), zur *Arbeitsmittelbenutzungsverordnung* (AMBV) und der *Betriebssicherheitsverordnung* (BetrSichV).

Die Vorschriften der Berufsgenossenschaften (BGV) sind Betreibervorschriften und sind von den versicherten Mitgliedern einzuhalten. Sie gliedern sich in Allgemeine Vorschriften (A), Einwirkungen (B), Betriebsart und Tätigkeiten (C) und Arbeitsplatz und Arbeitsverfahren (D). Daneben sind die Berufsgenossenschaftliche Regeln für Sicherheit (BGR) zu beachten. Nützliche Hinweise finden sich in den Berufsgenossenschaftlichen Informationen (BGI).

Das Arbeitsschutzgesetz dient dazu, Sicherheit und Gesundheitsschutz der Beschäftigten bei der Arbeit durch Maßnahmen des Arbeitsschutzes zu sichern und zu verbessern. Es gilt in allen Tätigkeitsbereichen, auch im öffentlichen Dienst, und für jeden Arbeitnehmer, auch für Beamtinnen und Beamte.

Grundsätzlich besteht nach der Gefahrstoffverordnung (GefStoffV, hier §17) eine allgemeine Schutzpflicht. In der Praxis der Brandursachenermittlung ist das dort formulierte Schema nicht vollständig umsetzbar. Dies gilt auch für die Arbeitsplatzgrenzwerte (maximale Arbeitsplatzkonzentration MAK, Arbeitsplatzgrenzwerte AGW). Für Brandermittler und Brandsachverständige ist das Arbeitsschutzgesetz dennoch soweit wie möglich umzusetzen.

Die Arbeitsmittel-Richtlinien fordern vom Dienstherrn oder Auftraggeber die Bereithaltung geeigneter Arbeitsmittel und die Überwachung deren Benutzung. Dienstherr oder Auftraggeber haben die Gefährdungen zu ermitteln, Maßnahmen zu treffen und die erforderlichen Ausstattungen zu beschaffen. Das Ergebnis der Gefährdungsbeurteilung und der daraus resultierenden Maßnahmen sind zu dokumentieren (ArbSchG §6). Die Gefährdung kann sich aus dem Arbeitsplatz (§5 (3) 1) oder durch physikalische, chemische und biologische Einwirkungen ergeben. Die Bediensteten haben auch autonom Maßnahmen zur Gefähr-

renabwehr und Schadensbegrenzung durchzuführen (§9). Der Dienstherr oder Arbeitgeber muss auf Wunsch der Beschäftigten eine regelmäßige arbeitsmedizinische Untersuchung (§11) ermöglichen, um zumindest den Status und Veränderungen zu erheben.

Er muss auch eine Unterweisung über die Sicherheit und den Gesundheitsschutz in aktualisierter und wiederkehrender Weise durchführen (§12).

Die Verantwortung für die Durchsetzung der gesetzlichen Pflichten trägt der Dienstherr oder Auftraggeber, aber er kann diese delegieren. Insoweit ist nach dem fachspezifischen Wissen nahe liegend, dass die Verantwortlichkeit hierarchisch nach unten weitergereicht wird. Der Verantwortliche sollte daher die Forderungen des Arbeitsschutzes umgehend und vollständig umzusetzen.

Im ArbSchG (§15) wird auf die Verpflichtung der Beschäftigten hingewiesen, zur Vermeidung von Gesundheitsgefahren aktiv mitzuwirken. Sie sind verpflichtet, die zur Verfügung gestellten Geräte, Werkzeuge, Arbeitsstoffe, Schutzvorrichtungen und die persönliche Schutzausrüstung u. a. zu verwenden.

Somit sind beiden Seiten Pflichten auferlegt. Der Verzicht auf Anwendung der Schutzmaßnahmen kann im Verletzungsfall zu erheblichen juristischen Auseinandersetzungen und Folgen führen.

In Brandfällen ist es gelegentlich nicht möglich, die Forderungen direkt umzusetzen. Beispielsweise wird die Untersuchung von elektrischen Leitungen auf Spuren eines Lichtbogens mit ungeschützten Händen durchgeführt, so dass der Hautschutz nicht realisierbar ist; deshalb sind zeitnah Reinigungs- und Hautpflegemaßnahmen durchzuführen. Auch bei Befragung eines Zeugen ist wegen der Sprachverständlichkeit das Tragen eines Atemschutzes nicht möglich; es sollten daher eine solche notwendige Kommunikation außerhalb des Gefährdungsbereiches vorgenommen werden. Eine wesentliche Schutzmaßnahme ist die Belüftung der Brandräume, was im Feuerwehrdienst empfohlen wird; diese Maßnahme widerspricht der Konservierung flüchtiger Brandbeschleunigungsmittel für den analytischen Nachweis.

2.7.1.3 Schutzmaßnahmen

Unter mehreren Schutzmaßnahmen ist dem Atemschutz eine besondere Bedeutung beizumessen. Nach EN 133 kann der Atemschutz mit umluftunabhängigen und mit umluftabhängigen Atemschutzgeräten verwirklicht werden; es sind daher Isoliergeräte und Filtergeräte zu unterscheiden. Atemschutzmasken, die Atemluft aus Druckluftflaschen beziehen, fallen in die Kategorie umluftunabhängig, während jene, die Umgebungsluft über ein Filter fördern, als umluftabhängig kategorisiert sind (siehe BGR 190, BGV A1).

Die umluftunabhängigen Atemschutzgeräte bieten zuverlässigen Atemschutz gegen gefährliche Rauch- und Brandgase. Voraussetzungen für das gefahrlose Tragen sind aber die Vorsorgeuntersuchungen nach dem berufgenossenschaftlichen Grundsatz G 26 sowie eine entsprechende Ausbildung und Übung. Diese Atemschutzgeräte werden

nach ihrem Gewicht und ihrem Atemwiderstand in die Gruppen 1 bis 3 (leichte, mittlere und schwere Atemschutzgeräte) eingeteilt.

Bei den Feuerwehren ist bei Brandeinsätzen daher das Tragen von umluftunabhängigen Atemschutz (Pressluftatmer – PA) und weiterer Ausrüstungsgegenstände der persönlichen Schutzausrüstung (u. a. Helm, Handschuhe, Stiefel, Einsatzkleidung) obligatorisch, wobei die Atemschutzerfordernisse nach Feuerwehrdienstvorschrift FwDV 7 – Atemschutz geregelt sind.

Bei Brandsachbearbeitern und Brandsachverständigen kann eine Atemschutztauglichkeit nach G 26 in der Regel nicht unterstellt werden; hierfür besteht auch keine zwingende Notwendigkeit. Sie müssen sich aber mit einem umluftabhängigen Atemschutz ausrüsten. Zu dieser Gruppe an Atemschutzausrüstungen gehören die Filtergeräte (früher: Gasmasken), deren Einsatz aber nur bei einer Sauerstoffkonzentration in der Luft über 17 % möglich ist. Dabei sind Kombinationsfilter ABEK-P3 zu verwenden, da die toxischen Stoffe unbekannt sind. Sobald während des Tragens des Filtergerätes ein Fremdgeruch wahrgenommen wird (Durchbruch), ist die Einsatzstelle zu verlassen und der Filter ist umgehend zu ersetzen.

Darüber hinaus ist auch die Verwendung von so genannten G 26-freien Geräten möglich. Hierzu gehören folgende Atemschutzgeräte:

- FluchtfILTERgeräte
- Sauerstoffseltretter bis 5 kg Einsatzgewicht
- Gebläsefiltergeräte mit Haube oder Helm
- Druckluftschlauchgeräte mit Haube oder Helm

Empfehlenswert erscheinen Druckluftschlauchgeräte mit Haube oder Helm (arbeitschutztauglich), wobei der Druckschlauch gelegentlich unhandlich erscheint und ein Kompressor vorgehalten werden muss. Dieser Nachteil wird bei den am Körper getragenen batteriebetriebenen Gebläsen und einem Helm umgangen. Am Gebläse können die erforderlichen Filter eingesetzt werden, so dass die geförderte Atemluft frei von toxisch wirkenden Substanzen wird. Der Atemschutz wird bei diesen Geräten durch einen permanenten geringen Überdruck im Kopfteil erreicht. Dabei muss kein Atemwiderstand überwunden werden. Mit dem Helm wird auch ein wirksamer Schutz des Kopfes gegen mechanische Einwirkung erreicht.

Regelungen zur Wartung, zur Hygiene und zu Reparatur- und Ersatzmaßnahmen sind bei G 26-Geräten den BGR 190 und bei G 26-freien Geräten den Herstellerhinweisen zu entnehmen.

Das Abkühlen des Brandes verläuft brandobjektspezifisch und zeitlich nicht vorhersehbar. Wegen der hohen Wärmekapazität und des geringen Wärmeübergangs mancher Objekte werden auch geringe Abkühlgeschwindigkeiten beobachtet, so dass durch Nachverdampfung oder Zersetzung Schadstoffe freigesetzt werden, die den bereits oben angeführten Schadstoffen entsprechen.

Ist der Brandort völlig abgelöscht, wird er auch als „kalt“ bezeichnet, weil der Brandschutt die Temperatur der Umgebung angenommen hat. Die meisten Schadstoffe sind dann bereits abgedampft und durch die Belüftung des Brandraumes aus dem Brandobjekt abgeführt. Zahlreiche gesundheitsgefährdende Substanzen sind aber adsorptiv am Ruß oder an den Pyrolyse- und anderen festen Verbrennungsrückständen gebunden. Die oftmals hochporösen Trägersubstanzen besitzen ein außergewöhnlich hohes Bindevermögen. Beim Umgang mit dem Brandschutt (Freilegen von Objekten, Umlagern u. ä.) werden zwangsläufig die mit dem Adsorbat beladenen Schwebepartikel aufgewirbelt, so dass sie auf ungeschützte Haut gelangen oder inhalativ bzw. oral aufgenommen werden können. Im Streulicht sind diese Partikel deutlich erkennbar und im Nasenschleim leicht nachzuweisen. Analytisch findet man alle oben schon erwähnten Substanzen. Besonders gefährlich sind die polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffe (PAK), die Dioxine und die Furane. Alle diese Substanzklassen besitzen ein kanzerogenes Potential, was insbesondere bei mehrfacher und lang andauernder Exposition zu schwerwiegenden Schädigungen führen kann. Dioxine und Furane können zu Chlorakne, Organschäden, Überpigmentierungen und Störungen des Fettstoffwechsels führen. Schon die wiederholte Aufnahme kleinerer Mengen kann zu chronischen Krankheitsbildern führen.

Als Schutz vor schadstoffbelasteten Stäuben kann ein umluftabhängiges Filtergerät mit P3-Filter eingesetzt werden. Damit kann verhindert werden, dass aufgewirbelter Staub inkorporiert wird. Es ist darauf zu achten, dass der Maskenkörper zur Kopfgröße des Trägers passt. Da beim Atmen in gebläselosen Masken ein Unterdruck entsteht, besteht bei Passungenauigkeiten die Gefahr des Eindringens von Staub. Dies gilt auch beim Einsatz von Teilmasken mit P3-Filterung, die deshalb nicht empfohlen werden können.

Die Toxizität der Schadstoffe an der Brandstelle kann durch eine Objektbegehung kaum beurteilt werden. Die Sachversicherer haben deshalb im Sinne einer komplexen Betrachtung eine „Richtlinie zur Brandschadensanierung“ (VdS 2357) herausgegeben, die für erkaltete Brandstellen anzuwenden ist. Implementiert sind die Anforderungen für Gefahrstoffe (TRGS 524) und das BG-Regelwerk über kontaminierte Bereiche (BGR 128). In der Richtlinie VdS 2357 werden, wie in der vfdb-Richtlinie 10/03, die für eine konkrete Brandlast notwendigen Maßnahmen in einer Tabelle dargestellt. Daraus werden die Gefahrenbereiche (GB) mit den Ziffern 0 bis 3 abgeleitet, wie in der Tabelle 7 dargelegt.

Bestehen Zweifel, welcher Gefahrenbereich am konkreten Brandort vorliegt, sollten immer die Maßnahmen des höheren Gefahrenbereiches durchgeführt werden. Die höheren Kosten und der höhere Aufwand dürfen nicht zum Verzicht des optimalen Schutzes führen.

Tab. 7: Übersicht Gefahrenbereiche

GB	Brandlast	Maßnahmen
0	<p>geringe, räumlich begrenzte Brandlasten wie bei</p> <p>Papierkorb-, Kochstellenbrand, Kerzengesteck;</p> <p>Verschmutzung nur im Brandbereich</p>	<p>haushaltübliche Schutzmaßnahmen</p>
1	<p>allg. übliche Mengen an Cl- und Br-organischer Stoffe, v. a. PVC,</p> <p>keine gravierende Schadstoff-Kontamination,</p> <p>ausgedehntere Brände in Wohnung, Küche, Zimmer, Keller, Dachboden, Büro, Schulen, Praxen, Läden, Gaststätten, Werkstätten</p> <p>GB 1a: Wohnbereich</p> <p>GB 1b: öffentliche Gebäude</p> <p>GB 1c: Gewerbe, Industrie</p>	<p>Einmalanzug, Einmalmaske P3, Schutzhandschuhe,</p> <p>Gummihandschuhe bei Nassarbeit, gründliche Körperreinigung</p>
2	<p>größere Mengen an Cl-/Br-organischen Stoffen, insbesondere PVC (Kabeltrassen, PVC-Lagerware, erhebliche Schadstoffkontamination</p>	<p>Spezialfirmen, besondere Schutzmaßnahmen,</p> <p>Vermeidung von Verschleppungen, arbeitsmedizinische Vorsorgeuntersuchung, Entsorgungskonzept, Tox-Experte empfohlen!</p>
3	<p>gewerblicher, industrieller Brand, größere Mengen toxischer Stoffe (GefStoffV),</p> <p>PCB (Trafo, Kondensator), Holzschutz (PCP),</p> <p>kritischer biologische Arbeitsstoffe in der Risikogruppe 3 oder 4 (BioStoffV)</p>	<p>Sperrung, Absicherung;</p> <p>Schwarz-Weiß-Schleuse, Sanierungskonzept, Dekontamination, Kombinationsfilter,</p> <p>besondere Schutzmaßnahmen, Entsorgungskonzept, Tox-Experte zwingend!</p>

Die überwiegende Zahl der Brände ist den Gefahrenbereichen 0 oder 1 zuzuordnen. Umso konsequenter sind die Schutzmaßnahmen der höheren Gefahrenbereiche durchzuführen. Die Untersuchung von Brandstellen sollte möglichst erst in der Kalt-Phase erfolgen. Aus dem Fehlen von Geruchswahrnehmungen darf nicht auf die Ungefährlichkeit des Brandortes geschlossen werden.

Der Arbeitsschutz regelt auch den Umgang mit asbesthaltigem Material. Seit 1993 besteht in Deutschland ein generelles Asbestverbot, innerhalb der EU darf Asbest seit 2005 weder verarbeitet noch in den Verkehr gebracht werden. Grundsätzliche Regelungen in Deutschland sind weiterhin in der Chemikalien-Verbotsverordnung – ChemVerbotsV und in der Gefahrstoffverordnung – GefStoffV niedergeschrieben (In den Verkehr bringen und Verarbeiten). Weitere Regelungen erfolgen in der BGR 128 und in der TRGS 519, wobei die TRGS 519 den Schutz der Beschäftigten und anderer Personen bei Tätigkeiten mit Asbest und asbesthaltigen Gefahrstoffen bei Abbruch-, Sanierungs- oder Instandhaltungsarbeiten (ASI-Arbeiten) und bei der Abfallbeseitigung regelt. An Brandstellen älterer Gebäude ist daher immer noch mit asbesthaltigen Baustoffen zu rechnen, wie

- ebene oder gewellte Asbestzementplatten (z. B. Eternitplatten),
- Fensterbänke aus Asbestzement
- Fassadenverkleidungen oder Dachziegel aus Asbestzement
- Asbestzementrohre
- Blumenkästen aus Asbestzement

oder in Form spezieller Materialien mit hohem Asbestgehalten wie

- mit Asbest gedämmte Nachtspeicheröfen
- Dichtungen aus Asbest in Maschinen, Rohren, Heizungsanlagen
- Wärmeschutzplatten aus Asbest

Die Regelungen gemäß TRGS 519 gelten für Beschäftigte und andere Personen und somit auch für Privatpersonen. Asbest ist entsprechend der GefStoffV als krebserzeugender Stoff mit besonders hohem Gefährdungspotential eingestuft. Eine Gesundheitsgefährdung ist beispielsweise schon bei mechanischer Beanspruchung und erst recht beim Bruch oder Trennen von asbesthaltigen Werkstoffen gegeben. Eingeatmete lungengängige Fasern können zu Erkrankungen der Lunge führen (Asbestose) oder auch bösartige Tumore verursachen. Asbesterkrankungen sind so genannte Langzeiterkrankungen.

Ältere Nachtspeicheröfen können Wärmedämm-Material oder Kernsteinträger aus Asbest enthalten. Ob ein Gerät asbesthaltige Teile enthält, kann beim zuständigen Energieversorgungsunternehmen (EVU, VNB) erfragt werden, wenn Hersteller, Baujahr, Typenbezeichnung und Seriennummer bekannt sind. Diese Angaben finden sich auf dem Typenschild. Beim Fehlen des Typenschildes kann das Baujahr und eine mögliche Asbestgefahr nur durch Dokumente und in Abstimmung mit dem Hersteller ermittelt werden.

Solange asbesthaltige Wärmespeicheröfen unbeschädigt bleiben, ist mit keiner Gesundheitsgefahr zu rechnen. Zu einer Freisetzung von Asbestfasern in die Raumluft kann es erst dann kommen, wenn ein solches Gerät durch Brandeinwirkungen oder andere den Brandverlauf begleitende Umstände zerstört oder auch im Rahmen einer technischen Untersuchung demontiert wird. In der Regel müssen asbesthaltige Geräte deshalb durch Fachkräfte staubdicht verpackt, zerlegt abtransportiert und entsorgt werden.

Hinsichtlich des Arbeitsschutzes für den Brandermittler und den Sachverständigen sind bei fehlenden Kenntnissen zum Risikopotential von einer höheren Gefährdung auszugehen. Bezüglich Atemschutz sollte deshalb eher ein Kombinationsfilter statt ein reiner Partikelfilter gewählt werden. Erforderlichenfalls sollte ein Filterwechsel am Untersuchungsort vorgenommen werden.

2.7.1.4 Verhaltensregeln

Für die Untersuchung des Brandortes sind also grundlegende Verhaltensregeln zu beachten, wobei hierfür die Einrichtung getrennter Nutzungsbereiche erforderlich ist, d. h. der so genannte Weißbereich ist den unkontaminierten Tätigkeiten vorbehalten, während im Schwarzbereich die Tätigkeiten mit kontaminierten Gegenständen und Material vorgenommen werden dürfen. Ein Hin- und Herwechseln in diesen Bereichen zerstört den Sinn dieser Arbeitsschutzmaßnahme. Im Einzelnen sollte gelten:

- Ablegen der Straßenkleidung (kontaminationsfrei) im Weißbereich
- Durchführung von Schreib- und Aufzeichnungsarbeiten im Weißbereich
- Anlegen und Ablegen der persönlichen Schutzausrüstung im Schwarzbereich
- Lüften des Brandortes (Achtung: analytische Erfordernisse!)
- Vermeiden von Staub- und Rußaufwirbelungen
- Ausschluss von Arbeiten an Gegenständen oder Geräten mit Asbestverdacht
- Vermeidung von Verschleppungen von Brandrelikten
- Reinigung von Werkzeugen am Brandort
- Abtransport (kontaminierter) Werkzeuge, Geräte u. a. in staubdichter Verpackung
- Abtransport der Asservate in staubdichter Verpackung (Brandbeschleuniger dampfdicht verpacken)
- Grobreinigung der arbeitsbedingt offenen Hautbereiche mit kaltem Wasser und viel Reinigungsmittel bis Haut visuell sauber ist; keine Lösungsmittel verwenden
- Nachreinigung der Haut mit warmem Wasser
- Benutzung von Duschen zur Ganzkörperreinigung
- Hautpflege nach erfolgter Ganzkörperreinigung
- Belassen von kontaminierter Einwegkleidung am Brandort

- Verpacken (kontaminationsfrei) von wieder verwendbarer Kleidung, wenn erforderlich, zwecks Reinigung durch Fachbetrieb - nicht in der häuslichen Waschmaschine
- Reinigung des Werkzeugs und der Messgeräte im Labor, Werkstätte oder Sonder-
raum in Dienststelle

Zum Transport der Personen, des Werkzeugs, der Messgeräte und der Asservate ist ein spezielles Einsatzfahrzeug für Branduntersuchungen anzustreben. Wegen des Arbeitsschutzes muss dieses Fahrzeug getrennte Arbeits- und Nutzungsbereiche im vorgenannten Sinne aufweisen (Schwarz-/Weiß-Bereich).

Folgende persönliche Schutzausrüstungen sind im Sinne des gebotenen Arbeitsschutzes erforderlich, wobei Kostenüberlegungen nicht primär entscheiden sollten:

- Gebläsefiltergerät nach EN 146/147 mit Visierhelm für Partikel-, Gas- und Kombinationsfilter
- Ansauggebläse am Gürtel mit Schlauch zum Helm
- Helm aus ABS mit Schlauchanschluss nach EN 397, 146, 147
- klappbare PC-Visier
- Überwachung der Saugleistung und des Akku-Zustandes
- Partikelfilter EN 146, 147
- Kombinationsfilter ABE-PSL oder ABEK-PSL
- Desinfektionsmittel
- Schutzanzüge für Staubarbeiten HDPE-Spinnvlies/PE-Anzug mit Kapuze, Type 5 (partikeldicht)
- Schutzanzug für Nassarbeiten oder Regen, HDPE-Spinnvlies/PE-Anzug. mit Kapuze, Type 4 (sprühdicht), Type 6 (begrenzt spritzdicht)
- für Chemiarbeiten und Brandbeschleuniger HDPE-Spinnvlies/PE-Anzug, Type 3 (flüssigkeitsdicht) und Type 4, 5 und 6
- Kopfschutz mit Feuerwehrhelm nach DIN 14940
- Schutzbrille nach EN 166 mit beschlagfreier Acetatscheibe
- Feuerwehr-Sicherheitsschuhe oder weniger geeignet: Gummistiefel mit Stahlsohle Kategorie S5
- ggf. Überschuhe HDPE CE III wg. Verschmutzung und Kontamination der Schuhe
- Schutzhandschuhe rau für mechanisch grobe Arbeiten aus einer Spezialnitrilmischung, Dicke 1 mm
- Schutzhandschuhe glatt für feinere Arbeiten, Nitril- der Einmalhandschuh, Dicke 0,28 mm
- Schutzhandschuh leicht, Vinyl-Einmalhandschuh mit niedrigem AQL-Wert, Dicke 0,12 mm

Die Kapuze des Schutzanzugs ist zuerst aufzusetzen und dicht anzulegen. Beim Gebläsehelm sind die Hinweise des Herstellers zu beachten. Der Helm soll passgenau sitzen, weshalb er ein persönliches Körperschuttmittel ist. Bei den Einmalschutzanzügen kann die maximal zulässige Tragezeit meistens nicht eingehalten werden. Deshalb sollte wenigstens eine Funktionsunterwäsche getragen werden.

2.7.1.5 Ergänzende Informationsquellen

Zusammenfassend besteht kein Zweifel, dass bei Branduntersuchungen organisatorische, arbeitsmedizinische und hygienische Maßnahmen durchzuführen sind und eine persönliche Schutzausrüstung (PSA) beschafft und benutzt werden muss.

Außerdem sind neben den in Abschnitt Schutzmaßnahmen angesprochenen Regeln und Verordnungen folgende Informationsquellen zu beachten, die als Entscheidungshilfe anzusehen sind:

ASR	Arbeitsstätten-Richtlinie
BGI, BGR, BGV	Berufsgenossenschaftliche Informationen, Regeln und Vorschriften (BGV A4, BGR 128 und 189, BGR 190 – 193, 195, 197)
PSA-BV	PSA-Benutzungsverordnung
TRBA	Technische Regeln biologische Arbeitsstoffe
TRBS	Technische Regeln Betriebssicherheit
TRGS	Technische Regeln Gefahrstoffe (TRGS 400 und 401)

Dabei ist darauf hinzuweisen, dass die dortigen umfangreichen Informationen auf den Arbeitsschutz im Brandbereich anzuwenden sind.

vfdb-Richtlinie 10/03

- Schadstoffe bei Bränden

ArbSchG (Arbeitsschutzgesetz)

- Gesetz über die Durchführung von Maßnahmen des Arbeitsschutzes zur Verbesserung der Sicherheit und des Gesundheitsschutzes

BetrSichV (Betriebssicherheitsverordnung)

- Verordnung über Sicherheit und Gesundheitsschutz bei der Bereitstellung von Arbeitsmitteln und deren Benutzung bei der Arbeit, über Sicherheit beim Betrieb überwachungsbedürftiger Anlagen und über die Organisation des betrieblichen Arbeitsschutzes

AGW (Arbeitsplatzgrenzwert)

- Wurde neu eingeführt in GefStoffV am 01.01.2005, soll später bisherige MAK (maximale Arbeitsplatzkonzentration) und TRK (technische Richtkonzentration) ersetzen

G 26 „Atemschutz“

BGG 904

- Berufsgenossenschaftliche arbeitsmedizinische Vorsorgeuntersuchung

BGI 504-26

- Auswahlkriterien für die spezielle arbeitsmedizinische Vorsorge nach dem Berufsgenossenschaftlichen Grundsatz G26 „Atemschutzgeräte“

2.7.2 Gefahren an der Brandstelle

2.7.2.1 Einsturzgefahr

Mit zunehmender Branddauer können tragende Bauteile instabil werden:

- Stahlträger dehnen sich infolge der Wärmebelastung aus und schieben Wandelemente aus ihrer Verankerung
- bei Überschreiten einer kritischen Temperatur verlieren sie ihre Tragfähigkeit
- Stahlbetonteile können reißen
- Holzkonstruktionen, z. B. Dachstühle, brechen zusammen

Nicht vergessen werden darf die durch den Löschwassereinsatz bedingte Erhöhung der Einsturzgefahr. Einerseits saugen sich bestimmte Materialien mit Wasser voll und erhöhen damit die Deckenlasten, andererseits können durch die Einwirkung des Wassers manche Baustoffe ihre Festigkeit verlieren (Lehmwände). In nicht eindeutig einschätzbaren Fällen sollten Spezialisten, z. B. der Baubehörden, zur Beurteilung herangezogen werden. Nicht jeder Bauingenieur oder Statiker ist jedoch in der Lage, die Stabilität eines Bauwerkes nach einem Brand umfassend und zuverlässig einzuschätzen. Ein wesentliches Kriterium bildet der Umstand, ob eine Brandstelle für die Brandursachenermittlung zugänglich sein soll oder aber zur Beräumung durch den Betreiber freigegeben wird.

2.7.2.2 Elektrizität

Beim heutigen Stand der Technik ist praktisch in jedem Brandobjekt mit dem Vorhandensein elektrischer Anlagen und Betriebsmittel zu rechnen. Durch die thermische Einwirkung werden elektrische Isolierungen von Kabeln, Leitungen und Betriebsmittel beschädigt bzw. zerstört. Dabei können Erd- und Kurzschlüsse und Fehlerströme entstehen, die nicht zu einem Ansprechen der dem Stromkreis vorgeschalteten Sicherungen führen.

Mechanische Belastungen, z. B. der Einsturz von Bauwerken, führen zum Durchtrennen elektrischer Leitungen. Bei jedem Brand kann somit eine Vielzahl von Einflussmöglichkeiten eine Schädigung der elektrotechnischen Anlage verursachen. Es sollte daher vor Aufnahme der Brandortarbeit die Anlage auf Spannungsfreiheit geprüft werden, denn Wechselspannungen über 50 Volt sind personengefährdend (Stromunfall). Ist eine Untersuchung in einer unter Spannung stehender Anlage durchzuführen, muss die Spannungsfreiheit vor Arbeitsbeginn nach den 5 Sicherheitsregeln (VDE 0105, BGV A3, BGR A3) dauerhaft hergestellt werden. Dabei ist das Sichern gegen ein Wiedereinschalten eine unverzichtbare Notwendigkeit.

2.7.2.3 Toxische Stoffe

Bei einem Brand erfolgt eine Umwandlung der an dem Verbrennungsprozess beteiligten Stoffe, die immer mit einer Freisetzung toxischer Produkte verbunden ist (siehe auch Abschnitt 2.7.1.1 und 1.5.8.2). Die eigentliche Brandursachenermittlung setzt zwar meist erst nach der Beendigung der Löscharbeiten ein, doch das Risiko des Vorhandenseins bzw. der weiteren Freisetzung toxischer Stoffe kann deshalb nicht ausgeschlossen werden.

Ist bei der Besichtigung des Brandortes eher von einer geringen Gefährdung auszugehen, stellt sich diese Situation bei der Brandortuntersuchung anders dar. Bei der Beräumung der kalten Brandstelle, insbesondere beim Untersuchen der Schichtung des Brandschuttes, können zusätzlich zu den vorhandenen Stoffen die verschiedensten Schwel- und Brandgase freigesetzt werden und Stäube entstehen. Neben den toxischen Stoffen, die durch den Brand entstanden sind, können in Abhängigkeit von den konkreten Bedingungen am Brandort auch von anderen Stoffen und Verbindungen Gesundheitsgefährdungen ausgehen. So ist ein Austreten gefährlicher Substanzen aus Behältern oder Lagerräumen möglich. Säuren und Laugen können zu Verätzungen führen, Gase und Dämpfe Vergiftungen verursachen. Die Schädigung muss nicht nur über das Einatmen erfolgen, eine Inkorporation ist auch über die Haut möglich (Permeation). Auch kontaminiertes Löschwasser ist als Gefahrenquelle nicht zu unterschätzen.

2.7.2.4 Brand- und Explosionsgefahren

So paradox es auf den ersten Blick auch erscheinen mag, auch nach dem Abschluss der Löscharbeiten muss unter Umständen noch von einer latenten Brand- und Explosionsgefahr, aber auch der Gefahr, dass Personen Verbrennungen erleiden können, ausgegangen werden. Gerade in Bezug auf letztere Feststellung ist davon auszugehen, dass eine große

Gefahr von nicht erkannten und nicht abgelöschten Glutnestern bei Schüttgütern, wie z. B. bei Erntegut, Stoffballen und Papierrollen besteht. Derartige Glutkessel sind manchmal so groß, dass ein Einbrechen einer Person in einen durch den Glutbrand hervorgerufenen Hohlraum tödlich sein kann. Das Betreten entsprechender Anhäufungen darf daher nur bei Anwesenheit einer zur Absicherung tätigen zweiten Person und unter Zuhilfenahme geeigneter technischer Hilfsmittel wie Sicherungsseile, Laufbohlen u. ä. sowie mit äußerster Vorsicht erfolgen.

Auch durch das Unterschätzen des Wärmespeichervermögens bestimmter Stoffe und Gegenstände kann ein vorschnelles Berühren scheinbar ausgekühlter Materialien und Ausrüstungen zu z. T. schwerwiegenden Verbrennungen führen.

Wie schon beschrieben, besteht die Möglichkeit, dass brennbare Flüssigkeiten aus Behältern oder Lagerräumen austreten und zu einer Brand- und Explosionsgefahr führen können.

Auch noch vorhandene Gase und Dämpfe wie z. B. das durch Pyrolyse entstandenes Kohlenmonoxid (CO) bzw. andere Pyrolyseprodukte können in Verbindung mit dem Luftsauerstoff in lokalen Bereichen zündfähige Gemische bilden. In diesem Zusammenhang können unüberlegte Handlungen, wie z. B. Schaltversuche an Elektroanlagen, der Umgang mit offenem Feuer u. a. zu gravierenden Folgen führen. Gleiches trifft für Anlagen zu, bei denen eine Staubemission möglich ist (Mühlen, Silos, landwirtschaftliche Betriebsstätten). Hier kann allein das Bewegen im Raum ein Aufwirbeln der Stäube bewirken und zur Ausbildung eines zündfähigen Gemischs führen.

2.7.2.5 Radioaktivität

Normalerweise sind Räume, Betriebe, Einrichtungen, Behälter, Anlagen u. a., in denen sich radioaktive Stoffe befinden, gelagert oder verarbeitet werden, entsprechend der Strahlenschutzverordnung gekennzeichnet.

Infolge von Bränden oder Havarien kann es jedoch vorkommen, dass diese Kennzeichnungen beschädigt oder vernichtet sind bzw. übersehen werden. Es ist daher in jedem Fall eines solchen Verdachts sicherzustellen, vor dem Beginn der Untersuchung eine örtlich sachkundige Person über mögliche Gefahren zu konsultieren.

Weiterhin liegen bei den Feuerwehren für die entsprechenden Objekte Einsatzpläne vor, aus denen die Grenzen der Bereiche der Gefahrengruppen, mögliche Gefahrenquellen sowie Verhaltensregeln hervorgehen.

Ausgehend von einer eventuellen Strahlenschutzüberwachung während der Brandbekämpfung sind für die weiteren Brandortarbeiten den gesetzlichen Anforderungen genügende Maßnahmen einzuleiten. Dazu gehören Messungen durch das Bundesamt für Strahlenschutz, die Feuerwehren oder durch Fachinstitutionen.

Aus den Darlegungen zu möglichen Risikofaktoren ergibt sich, dass der gedanklichen Vorbereitung hinsichtlich der eigenen Sicherheit eine hohe, in der Praxis aber leider

oftmals unterschätzte Bedeutung zukommt. Wesentlich erscheint daher, dass jeder, der eine Brandstelle betritt, um diese zu untersuchen, sich im Klaren darüber sein muss, dass er sich einer erhöhten Gefahr aussetzt. Ausgehend vom jeweiligen Brand und von der vorgefundenen Situation kommt es nun darauf an, konkrete Gefährdungsmomente zu erkennen und entsprechende Sicherheitsvorkehrungen zu treffen. Erst dann kann von einem verantwortungsbewussten und risikominimierten Verhalten gesprochen werden.

2.7.2.5 Biologische Gefahren

Biologische Agenzien wie beispielsweise Mikroorganismen (Bakterien, Viren, Pilze) und Toxine stellen eine Gefährdung u. a. für die Menschen dar und können unter bestimmten Umständen an Einsatzstellen nicht ausgeschlossen werden. Das Spektrum biologischer Agenzien und Toxine sowie ihre Wechselwirkungen sind äußerst komplex. Die Verbreitung kann durch Mensch-zu-Mensch-Kontakt, Aerosole, Tiere sowie Lebensmittel- und Wasserverunreinigungen erfolgen. Das Gefahrenpotenzial biologischer Agenzien und Toxine resultiert aus ihren charakteristischen biologischen Eigenschaften, worin sie sich stark unterscheiden können. Sie können eine Reihe von Erkrankungen verursachen, wie von der selten tödlich verlaufenden Brucellose bis hin zu den gefährlichen Formen von Lungenpest oder Lungenanthrax. Viele Agenzien und Toxine sind unter bestimmten Bedingungen labil und werden inaktiviert, wenn sie zum Beispiel Sonnenlicht, höheren Temperaturen oder anderen Umweltfaktoren ausgesetzt sind. Andere dagegen sind widerstandsfähiger. Anthraxsporen z. B. sind außerordentlich stabil und können in Böden jahrzehntelang überleben.

Neben den bekannten chemischen Gefahren durch Brand- bzw. brandbedingte Zersetzungsprodukte ist an kalten Brandstellen auch mit biologischen Gefahren rechnen, wenn hier zuvor z. B. biologische Arbeitsstoffe genutzt oder verarbeitet wurden. So ist u. a. bei Untersuchungen in Einrichtungen der Lebensmittelverarbeitung, in Krankenhäusern, in Biolaboren oder Entsorgungsbetrieben für biologische Abfälle nach Bränden die Biostoffverordnung zu Rate ziehen. Die hierin angezeigten Gefährdungsabschätzungen selbst sind nur bei entsprechender Fachkunde möglich, wie z. B. durch Fachbetriebe für Brandschadensanierungen, die ihre Fachkunde gemäß BGR 128 nachweisen müssen. Im Verdachtsfall ist deshalb zwingend in Erfahrung zu bringen, ob die geschädigten Einrichtungen die entsprechenden Fachbehörden informiert haben und die Brandstelle gesichert wurde. Sollte dies nicht der Fall sein, sind diese Schritte nachzuholen. Erst nach Besichtigung durch die Fachbehörde sind weitere Arbeitsschritte abzustimmen. Liegt noch kein Ergebnis vor, muss generell von einer Gefährdung der höchsten Stufe ausgegangen werden.

Zur Gefährdungsbeurteilung ist auch auf die Richtlinien VdS 2357 „Richtlinien zur Brandschadensanierung“ sowie die vfdb-Richtlinie 10/02 : 2002-12 „Feuerwehreinsatz in Anlagen mit biologischen Arbeitsstoffen“ zu verweisen. Letztere wurde im Herbst 2008 geprüft und weiter für aktuell befunden. Hier lassen sich auch wertvolle Hinweise für die persönliche Schutzausrüstung (Atemschutz, Körperschutz) entnehmen. Wesentlich hierbei im Sinne der Arbeitssicherheitsmaßnahmen ist eine Einstufung der Einsatzstelle in einen Gefahrenbereich, wobei nach VdS 2357 eine Einstufung von GB0 bis GB3 reicht. So besteht z. B. die Stufe GB3 nach einem ausgedehnten Brand in einem gewerblich-industriellen Bereich mit biologischen Arbeitsstoffen. In diesem Fall ist das

Hinzuziehen eines Sachverständigen zwingend erforderlich. Bei sich ändernden Einsatzbedingungen sind ggf. Überprüfungen der Gefährdungen notwendig. Wie schon vorge­nannt, ist der Einsatzort sicher abzusperrten. Personen, die Kontakt mit biologischem Material hatten, müssen erfasst werden. Eine entsprechende Dekontamination und ärztliche Behandlung ist vorzunehmen. Müssen im Verdachtsfall Asservierungen vorgenommen werden, ist eine für biologische Gefahren ausgelegte persönliche Schutzausrüstung zu tragen. Die Verpackung der Asservate hat so zu erfolgen, dass von diesen keine weitere Gefahr ausgehen kann. Nach dem Einsatz ist für eine sichere Dekontamination und Desinfektion der beteiligten Personen und eingesetzten Geräte zu sorgen.

Hinsichtlich der Fragen: Gibt es Nachweismöglichkeiten, wie ist eine Probenahme durchzuführen und wie ist mit den Probematerialien zu verfahren, gilt: Im internationalen Maßstab gibt es eine Vielzahl von Schnelltest-/Screening-Methoden zum Nachweis von biologischen Kampfstoffen/Krankheitserregern. Bisher werden biologische Detektoren z. B. in deutschen Gefahrenabwehrorganisationen kaum eingesetzt, daher liegen wenig praktische Erfahrungen vor. Darüber hinaus ist bezogen auf angebotene Testsets eine gewisse Zurückhaltung angezeigt, weil gerade komplexe biologische Agenzien nicht sicher nachgewiesen werden können. Hier ist nach einer, wie bei der Asservierung beschrieben, sicheren Probenahme eine weitergehende Untersuchung durch entsprechende Facheinrichtungen bzw. -behörden durchzuführen. Die erhaltenen Ergebnisse sind bei der weiteren Bearbeitung zu berücksichtigen.

Literatur

Babrauskas, V.: Ignition Handbook, Principles and applications to fire safety engineering, fire investigation, risk management and forensic science, 2003

Cicha, J.: Die Ermittlung von Brandursachen, Richard Boorberg Verlag GmbH & Co KG, 2004

DeHaan, J.D.: Kirk's Fire Investigation, 7th ed. Pearson/Prentice Hall, 2007

Fire Investigator: Principles and Practice to NFPA 921 and 1033, International Association of Fire Chiefs, Jones & Bartlett Pub., 2010

Frei-Sulzer, M., Suter, A.: Leitfaden zur Bearbeitung von Bränden und Explosionen, Kriminalistik-Verlag, Hamburg, 1971

Holzmann, W.: Lehr- und Studienbriefe Kriminalistik/Kriminologie, Band 10, Brandermittlung, Verlag Deutsche Polizeiliteratur GmbH, 2008

Kriminalistik Kleine Fachbuchreihe 4/3, Die Suche und Sicherung von Spuren, Teil III, Brände und Havarien, Publikationsabteilung des Ministerium des Innern der DDR, Berlin, 1974

Lentini, J., J.: Scientific Protocols for Fire Investigation, CRC Press Taylor & Francis Group (2006)

Krönke, K.: Gefahren an Brandstellen, Kriminalistik 1/1992, 19 ff.

3 Ermittlung von Brandursachen

Die Ermittlung von Brandursachen gehört wegen deren Vielfalt zu den schwierigsten Aufgaben der Feststellung von Schadensursachen. Das hängt aber nicht nur von der absoluten Vielfalt sondern auch von der Bandbreite der möglichen Ursachen in einem einzigen Brandobjekt ab. Zudem zerstört der Brand mit zunehmender Branddauer die für die Ursachenerforschung erforderlichen Spuren oder modifiziert sie so, dass deren Beurteilung erschwert wird. In nicht seltenen Fällen werden sogar die Träger der Spuren und somit natürlich auch die Spuren restlos vernichtet. Diese Problematik ist in der Kriminaltechnik und Schadensforschung singulär.

Es ist deshalb eine systematische Suche nach Spuren (siehe Punkt 2.6) erforderlich. Jeder Eingriff in das brandveränderte und labile System der Spurenträger und Spuren ist irreversibel und erfordert daher eine Extrapolation auf den Zustand vor dem Eingriff. Jeder voreilige Zugriff auf das System kann Spuren unwiederbringlich ändern oder gar zerstören. In diesem Sinne ist ein forsches und übereiltes Vorgehen der Feind des Erfolges.

Wegen der hohen Schäden und der Kosten einer Betriebsunterbrechung mit den bekannten schwerwiegenden Folgen wird auf den Brandermittler und den Sachverständigen verständlicherweise Zeitdruck ausgeübt. Diesem Druck muss Widerstand entgegengesetzt werden, um den Erfolg der Untersuchungen nicht zu gefährden. Sachliche Informationen zum Untersuchungsgang helfen dabei, diesbezüglich Vertrauen zum Auftraggeber oder zum Geschädigten herzustellen, denn nur bei gesichertem Ergebnis der Ursachenerforschung werden die Beteiligten des Schadensereignisses zufrieden gestellt werden können.

Um der gestellten Aufgabe gerecht werden zu können, ist die Kenntnis der zu erwartenden Spuren zwingend erforderlich. Diese Spuren stammen aus allen denkbaren Bereichen der Technik, der Physik, der Chemie, der Biologie und der Medizin. Sie werden während des Brandgeschehens durch Einwirkungsdauer, Temperatur, chemische, physikalische und mechanische Beeinflussung modifiziert. Auch Löschmittel, sekundäre Brände oder Explosionen (siehe Punkt 4.7) können solche Veränderungen herbeiführen. Diese vielfältigen Erscheinungsformen muss der Brandermittler und Sachverständige kennen, um beweisrelevante Spuren zu erkennen. Die Kenntnis dieser brandtypischen Spuren wird als Spurenkunde bezeichnet.

Brandtypische Spuren sind zum Beispiel ohne Zweifel die Verkohlungs-schichten an Holzoberflächen, die als Brandnarben bezeichnet werden (siehe Punkt 2.6.2.2). Jede thermische Veränderung von Oberflächen kann als brandtypische Erscheinung auftreten, wobei diese im Fall von brennbaren Stoffen von Versengungen oder Schmelzer-scheinungen bis zu Verkohlungen reichen und bei metallischen Oberflächen auch nur als Anlauffarben (siehe Punkt 2.6.2.7) erscheinen. Viele Proben erweichen in begrenztem Temperaturintervall, weshalb auch Verformungen wichtige Spuren darstellen. Das temperaturabhängige Ausdehnungsverhalten von Feststoffen kann auch entsprechende Verformungszustände oder Spuren erzwingen, da erhebliche Zug- und Druckbelastungen entstehen können. Bei Verbundmaterialien mit unterschiedlichem Temperatureaus-

dehnungskoeffizienten fallen lokale Abplatzungen, Absprengungen oder Abscherungen auf (siehe Punkt 2.4.2, 2.6.2 und 2.6.2.6)

Als wichtige Brandfolgespuren seien auch die Verrußung bzw. der Niederschlag von Ruß und Rauchgas an kälteren Oberflächen genannt (siehe Punkt 2.6.2.1). In diesem Zusammenhang müssen auch flächenbegrenzte, rußfreie Zonen erwähnt werden, die auf eine besonders intensive lokale Wärmebeanspruchung hinweisen und innerhalb ansonsten berußter Flächen auffallen.

Die Wärmeübertragung aus dem Brandzentrum an die Umgebung infolge Wärmeleitung, Konvektion und Wärmestrahlung führt zur thermischen Aufbereitung und Belastung der den Brand begrenzenden Flächen. Infolge der Thermik (Auftrieb) der Brandfolgeprodukte werden die Heißgase nach oben befördert; das Schadensbild erscheint an den Wänden als eine nach oben sich erweiternde Schadensfläche oder an der Decke als eine flächenbegrenzte Schadensspur oberhalb des Brandzentrums; dieses Erscheinungsbild ist brandtypisch und wird als Brandtrichter (siehe Punkt 2.6.2.3) bezeichnet. Die nach oben sich aufweitende Erhitzungszone wird als Plume bezeichnet

Besonders wichtige Spuren sind relativ scharf begrenzte Einbrennflächen an Oberflächen von brennbaren Materialien, die als Brandnarben bzw. Brandzehrungen mit großem Schadensgradienten auffallen (siehe Punkt 2.6.2). Sie können durch das Ausbringen flüssiger Brandbeschleunigungsmittel auf brennbare Trägermaterialien entstehen, weil diese in die saugfähigen Oberflächen eindringen und das Brandverhalten des Trägermaterials so modifizieren, dass dort ein begünstigter Abbrand erfolgt. Die entstehenden flächigen, scharf begrenzten Spuren können als Brandlegungsspuren von größter Bedeutung sein und verlangen nach chemisch-analytischer Untersuchung (siehe Punkt 2.6.2.7.5).

Relativ scharf abgegrenzte Flächen mit geringem oder keinem Schaden können durch eine Verdämmung der Oberfläche entstehen, wie z. B. durch Stuhlbeine oder abgelegte Kleidung, und sind daher zur Rekonstruktion des Zustandes der Örtlichkeit von erheblicher Bedeutung.

Das sachkundige Auffinden, Isolieren und Sichern der Spuren ist die wesentlichste Aufgabe des Brandermittlers und Sachverständigen (siehe Punkt 2.6). Mit Hilfe dieser Spuren muss er versuchen, den Zustand im Brandobjekt zum Zeitpunkt des Brandbeginns zu rekonstruieren, insbesondere dann, wenn erhebliche Eingriffe durch die Feuerwehr oder bereits Aufräumarbeiten durchgeführt worden sind. Gleichzeitig dienen diese Spuren auch dazu, den Brandausbruchsbereich (Brandzentrum) räumlich einzugrenzen. Hauptziel ist immer, die Brandausbruchsstelle so einzugrenzen, dass der Untersuchungsbereich übersichtlicher und überschaubarer wird und damit die Zahl der zu prüfenden Alternativursachen (siehe Punkt 4) reduziert wird. Die Beurteilung der Spuren soll auch zur Rekonstruktion des Brandverlaufs, also zur Rekonstruktion der zeitlichen und somit auch räumlichen Ausweitung des Brandes führen. Die Beurteilung sämtlicher brandtypischen Spuren (siehe Punkt 2.6) ermöglicht die Festlegung des Brandausbruchsortes und letztlich die Feststellung der Brandursache.

Dieses Verfahren der Eingrenzung des Brandausbruchsortes mittels Spuren und der Einzeluntersuchung von Spuren konkurrierender Ursachen innerhalb des spurenmäßig eingegrenzten Bereiches wird als **Eliminationsverfahren** bezeichnet. Es werden lageangepasst sämtliche am Brandort in Frage kommenden Brandursachen einzeln überprüft und gegebenenfalls ausgeschlossen (eliminiert). Details werden in Abschnitt 3.1 behandelt. Die somit festgelegte Ursache muss sich widerspruchsfrei in das gesamte Spurenbild einpassen und mit dem Brandverlauf in Einklang bringen lassen. Wenn diese Einengung auf eine einzige Brandursache nicht gelingt, dann kann mit diesem Verfahren eine eindeutige Klärung der Brandursache nicht durchgeführt werden. Es ist naheliegend, dass Brandfälle, wo Spuren und Spurenträger verändert oder vernichtet werden, somit zwangsläufig keine befriedigend hohe Aufklärungsrate haben können.

Wenn also das Eliminationsverfahren in diesem Sinne zu keinem eindeutigen Ergebnis führt, dann handelt es sich um eine spezifische Problematik des Brandgeschehens und nicht zwangsläufig um das Ergebnis einer ungenügenden Arbeit am Tat- oder Ereignisort. Es ist aber darauf hinzuweisen, dass die Vielzahl der Spuren oder deren brandbedingtes Erscheinungsbild tatsächlich dazu führen kann, dass Spuren latent bleiben oder nicht zu interpretieren sind und dass Rekonstruktionsversuche oder Laborexperimente (siehe Punkt 6.1, 6.2) nicht durchgeführt werden können und insoweit eine Klärung der Brandursache erschwert wird oder gar ausgeschlossen ist.

Das Eliminationsverfahren kann auch dazu führen, dass an Hand der Spuren alle damit in Zusammenhang stehenden Ursachen ausgeschlossen werden können und dass deshalb auf eine andere reale Brandzündungsart geschlossen werden muss, deren Spuren durch den Brand untergegangen sind. Dieser spurenlose Beweis einer Brandursache macht gelegentlich vor Gericht insoweit Schwierigkeiten, als eben kein gegenständliches Beweismittel vorweisbar ist. Aus diesem Grunde ist es zwingend, das Eliminationsverfahren mit höchster Präzision und Ernsthaftigkeit durchzuführen, um dennoch einen indirekten Sachbeweis zu liefern.

Wesentlich einfacher gestaltet sich daher der **direkte Sachbeweis**, der im Abschnitt 3.2 vertieft zu besprechen ist. Hier lässt sich die Brandausbruchsstelle eindeutig konkretisieren und die singuläre Ursache spurenkonform angeben. Bei räumlich begrenzten Bränden ist diese Beweisführung häufig anzuwenden. Eine direkte Beweisführung ist auch beim Vorhandensein der typischen Spuren von flüssigen Brandbeschleunigungsmitteln möglich, wobei auf die analytische Bestätigung (siehe Punkt 5.3) nicht verzichtet werden sollte. Die Spuren müssen also eindeutig in das zeitliche und örtliche System einzupassen sein. Es sollte aber immer auch die Peripherie der Ausbruchsstelle untersucht werden, um auch Fragen zu einem später durchzuführenden Eliminationsverfahren beantworten zu können.

Unabhängig von der gewählten Nachweismethode ist darauf hinzuweisen, dass das alleinige Vorhandensein von brandgefährlichen Einrichtungen (siehe Punkt 4) selbstverständlich noch nicht aussagt, ob diese brandursächlich waren. Gerade die Elektrik (siehe Punkt 4.3.6), die praktisch heute überall vorhanden ist, kann erhebliche brandgefährliche Zustände besitzen, muss aber nur wegen ihres Vorhandenseins noch lange nicht brandursächlich sein. Man könnte sich dann nämlich Einzeluntersuchungen immer ersparen. Es ist also auch hier eine umfangreiche Detailuntersuchung erforderlich.

Es ist immer zu beachten, dass auch eine durch Spuren direkt beweisbare oder im Eliminationsverfahren festgestellte Brandursache auch eine Folge eines anderen Fehlers, eines Mangels oder einer anderen Störung sein kann, die sich nicht durch Spuren allein darstellen lassen. Schon geringfügige Änderungen in Betriebsabläufen oder Betriebsbedingungen können zu brandgefährlichen Zuständen führen. Es sind daher erstmals verwendete oder anders spezifizierte Materialien, Maschinen oder Arbeitsverfahren zu untersuchen. Problematisch ist auch das Ausreizen von Grenzbereichen und Einsatzgrenzen. Arbeitsverfahren und Maschinen, die nicht dem Stand der Technik entsprechen oder außerhalb des bestimmungsgemäßen Gebrauchs verwendet werden, müssen in die Untersuchung mit einbezogen werden.

Eine besondere Herausforderung besteht bei technischen Fehlfunktionen und bei provozierten oder vorgetäuschten Brandursachen, um von anderen Ursachen abzulenken oder eigene Fehlhandlungen oder eigenes Unterlassen zu vertuschen. Diese Handlungsweisen führen nämlich auch zu beweiskräftigen Spuren und so zu vermeintlich erwiesenen technischen Ursachen; dadurch können aber Fahrlässigkeiten und Vorsatzhandlungen im Dunkelfeld verbleiben.

3.1 Eliminationsverfahren

Das Eliminationsverfahren, auch Ausscheidungsverfahren genannt, (siehe Punkt 3) zielt darauf ab, von den denkbaren Möglichkeiten einer Brandzündung am konkreten Brandort alle bis auf einige Varianten oder gar eine einzige Variante auszuschließen. Dabei sind nur die konkreten Möglichkeiten zu erfassen; ein pures Abarbeiten aller denkbaren Brandursachen ist zu vermeiden und auch gar nicht zielführend. Es ist bei ausgedehnten Brandflächen davon auszugehen, dass eine negative Feststellung, also ein Ausschluss, leichter zu treffen ist als die direkte Beweisführung (siehe Punkt 3.2). Das Eliminationsverfahren ist daher das eigentliche Verfahren zur Feststellung der Brandursache.

Durch das Eliminationsverfahren kann trotz Vorliegens eines chaotischen Systems die Zahl der Brandursachen zumindest eingegrenzt werden. Dies ist bereits als Erfolg zu verbuchen, weil durch die subjektiven Beweise häufig eine weitere Einengung erfolgen und sogar eine Klärung der Brandursache herbeigeführt werden kann. Im Idealfall führt das Eliminationsverfahren zur Feststellung einer einzigen Ursache und somit zu einer eindeutigen Klärung der Ursache eines Brandes, auch wenn der Spurenbeweis nicht direkt zu erbringen ist.

Es ist bei einem solchen Verfahren zwingend erforderlich, alle in Betracht zu ziehenden Brandursachen (siehe Punkt 4) und die damit verbundenen Spuren und Begleiterscheinungen (siehe Punkt 2.6) zu kennen. Die Zahl der Brandursachen wird sich ständig erweitern, so dass eine ständige Lernbereitschaft vorhanden sein muss. Mit jedem neuen Gerät oder Verfahren sind Risiken verbunden, die unter bestimmten Umständen auch eine Brandgefahr implizieren. Gelegentlich wird eine neue Brandursache erst dadurch erkannt, dass sich Schadensfälle mit gleichem Spurenbild wiederholen und bislang keine befriedigende Erklärung gegeben werden konnte. Als Beispiel sei die Selbstentzündung von Wäschestapeln genannt, die erst durch eine Vielzahl von gleichartigen Fällen und intensiven analytischen Untersuchungen als Ursache erkannt wurde (siehe Punkt 4.2.1.5).

Die Beurteilung von Brandursachen setzt natürlich die spezifischeren Kenntnisse der effektiven Zündquellen und deren Eigenschaften voraus. Diese werden in Abschnitt 4 vertieft behandelt. Ebenso gehört eine vertiefte Kenntnis der Inbrandsetzungs- und Verbrennungseigenschaften der vielen brennbaren Materialien dazu (siehe Punkt 1.4), deren Zahl ständig zunimmt und deren Eigenschaften technologisch veränderbar sind.

Wichtigste Aufgabe des Brandermittlers und des Sachverständigen ist die Festlegung des Brandausbruchsbereiches bzw. des primären Brandzentrums. Wenn eine solche Einengung mit dem Hilfsmittel der Spuren nicht gelingt, dann gestaltet sich das Eliminationsverfahren sehr schwierig und umfangreich. Es erscheint sodann geboten, den gesamten Brandbereich zu untersuchen, was nicht nur erhebliche Untersuchungszeit mit sich bringt, sondern auch die Zahl der zu beurteilenden denkbaren Ursachen deutlich erhöht.

Bei der Durchführung des Eliminationsverfahrens darf der Untersuchungsbereich nicht zu eng gewählt werden. Eine zu starke Reduzierung der Untersuchungsbereiche kann den Wert des Eliminationsverfahrens sehr beeinträchtigen. Gerade wenn es um die Frage der Übertragung von Zündenergie auf benachbarte Gegenstände geht, z. B. durch Wärmestrahlung oder Funkenflug, ist die Miteinbeziehung der Peripherie notwendig. Das bedeutet auch, dass man sich Kenntnis über die Inbrandsetzungs- und Brenneigenschaften der peripheren Materialien und Gegenstände verschaffen muss.

Für die Aufgabe der Brandursachenermittlung stehen natürlich diverse Hilfsmittel zur Verfügung, deren sich Brandermittler und Sachverständige bedienen müssen (siehe Punkt 2.6, 5). Die strikte Trennung des objektiven Sachbeweises vom subjektiven Beweis ist in Brandfällen nicht empfehlenswert. Der Verzicht auf subjektive Beweise kann gerade bei hohen Zerstörungsgraden eine sinnvolle Untersuchung behindern oder gar unmöglich machen. Es ist für eine korrekte gutachterliche Aussage aber zwingend erforderlich, objektive und subjektive Beweise strikt zu trennen und diese auch entsprechend zu bezeichnen oder zu kennzeichnen. Denn die Würdigung der subjektiven Beweise erfolgt letztendlich durch das Gericht, wobei der Sachverständige als beratender Gehilfe des Gerichts tätig wird.

Die Methode der Berücksichtigung auch subjektiver Beweise erscheint für Experten außerhalb der Brandursachenerforschung überraschend. Geht man davon aus, dass nur der Sachbeweis von höchstem Wert ist, kann man diese Überraschung teilen. Die Erfahrung bei der Brandursachenerforschung belegt aber eindeutig, dass hier diese Einengung nicht sinnvoll ist und auch nicht gegen die Pflichten des Sachverständigen verstößt.

In der Regel ist die Schutzpolizei oder der Sachbearbeiter der Kriminalpolizei im gesetzlichen Auftrag zeitlich vor den Sachverständigen vor Ort und kann erste Befragungen oder Ermittlungen durchführen (siehe Punkt 2). Er beschlagnahmt als Vertreter der Staatsanwaltschaft in der Regel das Brandobjekt, um Änderungen auf das notwendigste Maß zu beschränken oder gar zu verhindern. Die Ergebnisse der Erstbefragung von Beteiligten und Zeugen kann das Eliminationsverfahren ganz erheblich vereinfachen, wenn der Brandausbruchsbereich dadurch schon eingengt wird. Gerade bei Großbränden bzw. bei großflächigen Brandobjekten ist eine solche Einengung notwendig und

sinnvoll; nur der Brandmittelspürhund, (siehe Punkt 2.6.4) kann große Flächen in kurzer Zeit bestreichen. Die auf diese Weise erfolgte Einengung des Brandausbruchsbereichs ist durch die nachfolgende Detailuntersuchung selbstverständlich zu verifizieren.

Die zumindest informatorische Befragung der Geschädigten oder Betroffenen, der Passanten, des Personals oder anderer Zeugen im Frühstadium der Ermittlungen verschafft häufig einen guten Überblick über das Anfangsgeschehen (siehe Punkt 2.3). Die frühen Angaben weisen nicht den Mangel an Erinnerung auf und sind in der Regel frei von Absprachen und Beeinflussungen. Es ist selbstverständlich zu beachten, dass diese Angaben nicht die Qualität einer Zeugenangabe aufweisen können.

In ähnlicher Weise können frühe Erkenntnisse über Änderungen eines betrieblichen Ablaufes oder eines Einsatzes anderer, neuer oder modifizierter Materialien oder über andere Singularitäten und Auffälligkeiten die Untersuchungen erleichtern und auch den Verlust von Beweismaterial verhindern. Auch der Ausfall bestimmter technischer Einrichtungen kann erheblichen Hinweiswert besitzen. Das Verhalten des Personals kann hier hinterfragt werden, wenn gebotenes Tun oder fahrlässiges Unterlassen thematisiert werden muss, gerade wenn es um die Einhaltung von betrieblichen Verhaltensweisen oder gar Unfallverhütungsvorschriften geht.

Eine besondere Bedeutung kommt den Einsatzkräften der Feuerwehr zu. Diese sind häufig die ersten Zeugen, welche die Brandphänomene beobachten können und die nicht unter dem Stress der Geschädigten oder Beteiligten stehen. Sie sind nicht nur frühestmöglich am Brandort, sondern können auch unter Vollatemschutz Feststellungen im und am Brandobjekt treffen, wie sie kein anderer Beteiligter leisten kann.

Der Ausbildungsstand der Feuerwehren darf als so gut unterstellt werden, dass eine große Chance an objektiven Wahrnehmungen angenommen werden darf. Die Feuerwehrleute kennen die Themen des vorbeugenden und abwehrenden Brandschutzes und kennen auch das berechnete Interesse der Ermittlungsbehörden bezüglich der Branddynamik, des Schließzustandes eines Brandobjektes oder anderer Auffälligkeiten und Anomalien. Die Fragen sollten nicht nur an den Einsatzleiter, sondern insbesondere direkt an die Erstangriffstrupps gerichtet werden, um unverfälschte Angaben zu erhalten.

Dieser Kontakt zur Feuerwehr ist schon allein deshalb erforderlich, weil im Rahmen der Löschmaßnahmen zum Teil ganz erhebliche Änderungen am und im Brandobjekt oder in der Spurenlage herbeigeführt werden. Diese können so umfangreich oder so kompliziert sein, dass eine Rekonstruktion nach dem Augenschein nicht mehr möglich ist. So kann häufig nur der Erstangriffstrupp Angaben zum Zustand der Überstromschutzeinrichtungen oder zum Ausmaß des Anfangsbrandes machen. Damit sind zum Beispiel wichtige Informationen bezüglich des primären Brandbereiches verbunden. Abrisse von Gebäudeteilen zur Eigensicherung überdecken Spuren, die die Feuerwehr möglicherweise vorher erkannt hat und beschreiben kann.

Mit Hilfe der Angaben der Feuerwehr ist es auch möglich, die vormalige Einrichtung von Räumen unschwer zu rekonstruieren, wenn bereits Beräumungsmaßnahmen durchgeführt worden sind. Diese Angaben erleichtern zumindest die Aufgabe der Rekonstruktion. Die oftmals zeitaufwändige Rekonstruktion des Einrichtungszustandes ist sehr hilf-

reich, weil dann mit Hilfe der durchgängigen Spurenkonformität eine sichere Rekonstruktion erfolgen kann und so Aussagen zur Branddynamik getroffen werden können. Für die Ermittlung des primären Brandzentrums ist die Rekonstruktion häufig unentbehrlich.

Im Zuge der Untersuchungen können spezifische Fragen auftreten, die nur Fachpersonal beantworten kann. Dieses steht bei den Fachkräften der Verteilungsnetzbetreiber (VNB), früher Elektroversorgungsunternehmen genannt (EVU), der Gasversorger, des Schornsteinfegerhandwerks, der Elektrofachbetriebe oder der Prüforganisationen zur Verfügung. Diese verfügen häufig über Planungs- und Betriebsunterlagen, ohne die eine Untersuchung gar nicht korrekt durchzuführen ist. Solches Personal kann mit dem gerichtlichen Begriff des sachverständigen Zeugen umschrieben werden.

Fachpersonal steht auch bei den Herstellern von technischen Geräten und Einrichtungen zur Verfügung. Häufig ist auch mit diesen Personen zusammenzuarbeiten, weil nur diese über die notwendigen Unterlagen oder die Spezialwerkzeuge verfügen. Im Übrigen können Vergleichsgeräte und -einrichtungen häufig nur über die Hersteller beschafft oder vermittelt werden. Der Brandermittler und der Sachverständige müssen sich allerdings bewusst sein, dass sich diese Personen in einem Abhängigkeitsverhältnis befinden und daher nur die für die Hersteller unschädlichen Informationen herausgegeben werden. Insoweit ist dieser Personenkreis zwar durchaus fachkundig, die Aussagen könnten aber unvollständig sein, so dass diesem nicht einmal die Qualität einer Zeugenaussage zukommen kann.

Die Sachversicherer (Gebäudeversicherer) verfügen in der Regel über wertvolle Unterlagen über die Brandobjekte und natürlich über den Umfang und die Entwicklung des Versicherungsschutzes. Hier werden im Rahmen der Risikoanalyse auch Bewertungen der immanenten Gefährdung eines Betriebes vorgenommen und bezüglich der Außensicherung auch Sicherungseinrichtungen oder -maßnahmen festgelegt. Gerade bei Nutzungsänderungen sind die diesbezüglichen Kenntnisse von großer Bedeutung.

Bei hohen brandbedingten Zerstörungen ist die Begutachtung von Vergleichsgeräten oder Vergleichsobjekten immer ratsam. Dadurch können nicht nur der vormalige Aufbau einer Anlage, einer Maschine, einer Baukonstruktion und deren Zugänglichkeit rekonstruiert werden, sondern auch Schwachpunkte erkannt werden. Diese Vorgehensweise verlangt nach der entsprechenden Kontaktaufnahme mit den Geschädigten, anderen Nutzern, den Planern, den Errichtern oder Herstellern. Dabei ist Ziel, objektive Erkenntnisse zu erlangen, die durch Unterlagen und Befragungen zu ergänzen sind.

Gelegentlich sind die Untersuchungen durch Experimente zu ergänzen (siehe Punkt 6.3). Dies können Rekonstruktionsversuche vor Ort sein, aber auch einfache Tests, wie zum Beispiel der so genannte Streichholz-Test aus den VDE-Bestimmungen zur Feststellung der Leichtentflammbarkeit (DIN 4102 B3). Versuche im Maßstab 1:1 sind sehr selten, da sie aus vielerlei Gründen erschwert oder zu aufwändig sind. Versuche im Brandversuchsraum (siehe Punkt 6) dagegen sind sehr hilfreich, wenn es insbesondere um die Frage der Entzündbarkeit und der anfänglichen Ausbreitung eines Brandes geht oder um die Verifizierung eines speziellen Spurenbildes.

Brandrückstände können Substanzen speichern, die vor oder während des Brandes anwesend waren. Es sind daher auch scheinbar unbedeutende Spurenräger zu beachten. Dies gilt insbesondere für solche Spurenräger, die charakteristische Einbrennsuren von flüssigen Brandbeschleunigungsmitteln aufweisen oder die durch die Anzeige des Photoionisationsdetektors (siehe Punkt 5.3.1.1, 2.6.3) oder olfaktorisch auffallen. Letztlich sind alle Spuren (siehe Punkt 2.6) von Bedeutung, die einen Hinweis auf das Temperaturprofil und die Branddynamik aufweisen.

3.2 Direkter Beweis

Wenn innerhalb des eindeutig feststellbaren Bereiches des primären Brandes (Brandentstehungsort, Brandzentrum) eine einzige technische Brandursache vorliegt, dann kann ein direkter Beweis geführt werden. Die Anforderungen an die Qualität des Beweises sind sehr hoch. Insbesondere kann sich bei zu enger Begrenzung des Brandausbruchsbereiches fälschlicherweise eine singuläre Brandursache anbieten. Es ist daher dennoch in begrenztem Maß ein Eliminationsverfahren nötig, das den direkten Beweis absichert.

Im Fall des Nachweises eines Brandbeschleunigungsmittels (siehe Punkt 5.3) scheint der direkte Beweis offenkundig. Durch den Nachweis eines Brandbeschleunigungsmittels ist aber zum Beispiel noch nicht erwiesen, dass dieses willentlich zur Brandlegung verwendet worden ist. Es ist deshalb genau zu recherchieren, ob dieses Mittel nicht a priori in diesem Bereich gelagert oder verwendet worden ist. So könnte die alleinige Abstützung der Brandursache auf das Brandbeschleunigungsmittel die Feststellung der wahren Brandursache unmöglich machen. In Einzelfällen können solche Brandbeschleunigungsmittel sogar während des Brandes freigesetzt werden.

Es darf auch nicht unberücksichtigt bleiben, dass Schadensspuren mit ausgeprägten Schadensgradienten zur Annahme des Abbrandes von Brandbeschleunigungsmitteln führen können. Durch späteren analytischen Negativ-Beweis könnte sich die Annahme oder Vermutung als falsch erweisen; wenn das Brandobjekt zwischenzeitlich nicht mehr zu untersuchen ist, muss die Brandursache ungeklärt bleiben. Insoweit kann also eine Einengung auf die direkte Beweisführung problematisch sein.

3.3 Sachkundige Feststellung der Brandursache

Unabhängig von der Methode der direkten oder indirekten Beweisführung (siehe Punkt 3.1, 3.2) muss das Ergebnis der Untersuchungen in dem Sinne eindeutig sein, dass alternative Ursachen in ihrem Wahrscheinlichkeitsgrad deutlich differenzierbar sind oder dass der einen Ursache ein sehr hoher Wahrscheinlichkeitsgrad beigemessen wird oder eine einzige Ursache darstellbar ist. Letztlich dient die Feststellung der Brandursache dazu, die objektive Grundlage für weitreichende Entscheidungen zu liefern, seien es strafrechtliche, zivilrechtliche oder versicherungstechnische.

In jedem Fall muss die Brandursache so überzeugend herausgearbeitet sein, dass sie nachvollziehbar ist und jeglicher Prüfung durch Gerichte, Betroffene und Sachverständige standhält. Die Ansprüche an den unverzichtbaren Sachbeweis nehmen daher zu und damit auch die Anforderungen an die Brandursachenermittler und die Sachverständigen.

Berichte und Gutachten sind daher einem Personenkreis vorbehalten, die entsprechend sachkundig sind und das Thema Brandursachen zu ihrem Haupttätigkeitsfeld gemacht haben. Es muss darauf hingewiesen werden, dass dieser Personenkreis nicht nur ein fundiertes wissenschaftliches Wissen in den naheliegenden Gebieten der Thermodynamik und vertiefte Kenntnisse der Spurenkunde vorweisen muss, sondern über ein sehr breites Wissen in den Fächern Chemie, Physik, Werkstoffkunde u. a. verfügen muss. Die Bearbeitung von Brandfällen wird sehr stark vom Erfahrungsschatz geprägt, wobei die jahrelange Einbindung in einen Fachkollegenkreis förderlich ist, wenn nicht sogar notwendig. Es zeigt sich in der Praxis der Brandursachenerforschung immer wieder, dass die gelegentliche Beschäftigung mit dem Thema Brandursachen nicht ausreichend ist, einen akzeptablen Sachbeweis zu liefern. Ebenso reicht es nicht aus, fachkundig in benachbarten Fachgebieten tätig zu sein, wie zum Beispiel im abwehrenden oder vorbeugenden Brandschutz oder im Ingenieurbau.

Die Beurteilung der Spurenbilder, die Beiziehung diverser Anknüpfungstatsachen und Unterlagen, das Studium der wissenschaftlichen Literatur und die Durchführung von Versuchen und Berechnungen führen zu ergänzenden Hinweisen oder Teilentscheidungen. Es ist schon in diesem Vorfeld von Entscheidungen der vom Sachbeweis geforderte Qualitätsanspruch (siehe Punkt 7 und 8) zu beachten und jede Zusatzinformation kritisch zu prüfen, um die Objektivität der Aussage nicht zu gefährden oder in Frage zu stellen.

Nach den ersten Untersuchungen kann das erzielte Untersuchungsergebnis eben nur die Qualität der „Vorläufigkeit“ besitzen, solange die Untersuchungen nicht vollständig abgeschlossen sind. Häufig müssen die am Brandort erhobenen Befunde ergänzt werden. Dies impliziert, dass das Eliminationsverfahren möglicherweise noch nicht in dem Sinne des Ausschlusses aller denkbaren Ursachen abgeschlossen sein kann und dass deshalb noch weitergehendere Untersuchungen und Befragungen erforderlich sind, wodurch in der Regel eine Verdichtung des Schlussergebnisses erfolgt. Andernfalls würde die zu frühe Festlegung auf ein Ergebnis keinen Anlass zur weiteren Beschaffung von Beweismaterial oder Zusatzstatsachen geben, was letztlich die Klärung der Ursache unmöglich machte.

Wenn Teilaspekte der Brandursachenfeststellung durch eigenes Wissen und Können nicht zu bearbeiten sind, dann müssen die Brandermittler und Sachverständigen den Mut aufbringen, dies auch unmissverständlich zu erklären. Der Wissensmangel mag diesen zwar ärgerlich erscheinen, in Wahrheit demonstriert aber das offen eingestandene Wissensdefizit deren Souveränität und Verantwortungsbewusstsein.

Es ist eine wesentliche Aufgabe des Brandermittlers und des Sachverständigen für Brandursachen, bei der Auswahl des geeigneten zusätzlichen Fachpersonals oder eines anderen Sachverständigen beratend mitzuwirken. In jedem Fall ist die Zustimmung des Auftraggebers notwendig, da dieser sich in der Regel sogar die Beauftragung vorbehält. Dies gilt insbesondere für Aufträge von Gerichten. Die Mitwirkung anderer Personen ist in allen Berichten und Gutachten kenntlich zu machen. Eine solche Hilfestellung von Experten macht die Berichte und Gutachten eher überzeugender, wenn der Auftraggeber dieser zugestimmt hat.

Die zu erstellenden Berichte und Gutachten (siehe Punkt 7, 8.1.3) sind nach Anknüpfungstatsachen und Befundtatsachen voneinander zu trennen; in der Schlussbemerkung werden eine Zusammenfassung der eigenen Befunde erstellt und die Bewertung der Befunde in Zusammenhang mit der gestellten Beweisfrage vorgenommen. Details hierzu sind in Abschnitt 7 zusammengefasst.

Im Bericht bzw. Gutachten sind also alle Anknüpfungstatsachen mit Quellenangaben zu nennen, alle eigenen Befunde nachvollziehbar zu beschreiben und zu dokumentieren. Die Berichte anderer Experten sind vollständig einzubinden, wenn sie nicht als Anhang beigegeben werden. Die Abweichungen von normalen, üblichen, vereinbarten oder geforderten Betriebszuständen und physikalischen Größen sind darzulegen. Diese können mit Hilfe eigener Messungen erhoben, aber auch Aufzeichnungen, Protokollen, Schreiberstreifen oder Dateien entnommen worden sein. In jedem Fall sind die Daten zu belegen. Analytische Ergebnisse oder Ergebnisse von Versuchen sind nachvollziehbar darzustellen oder als Anhang beizufügen.

Vielfach genügt dem Auftraggeber nicht allein die Feststellung der Brandursache, sondern er verlangt nach einer Wertung der Vermeidbarkeit und der Verantwortlichkeit. Der erfahrene Brandermittler und Sachverständige kann in diesem Zusammenhang daher auch Verstöße gegen Vorschriften und Bestimmungen anführen; dies ist gelegentlich sogar erforderlich, wenn die Besorgnis besteht, dass z. B. technische Vorschriften oder Betriebsanweisungen oder Unfallverhütungsvorschriften sachverständig interpretiert werden müssen.

Literatur siehe S. 404 u. f.

4 Brandursachen

In der Literatur zum Thema „Brandursachen“ wurde schon immer versucht, eine Systematik der Brandursachen zu schaffen, um einen Überblick aller Brandursachen zu vermitteln. In keinem der vorgelegten Schemata ist es gelungen, alle Ursachen widerspruchsfrei, systematisch und logisch aufzuzeigen. Es kann daher jedes Schema nur ein Versuch sein, die Brandursachen einigermaßen überschaubar zu ordnen.

So könnte man den Fremdzündungen die Selbstentzündungen gegenüberstellen, wobei die zahlreichen Fremdzündungen in keinem Verhältnis zur begrenzten Möglichkeiten der Selbsterwärmungen stehen. Nur phänomenologische Ordnungen können nicht überzeugen, da ihnen eine innere Systematik fehlt. Auch die in Normen vorgenommene Einteilung nach der Herkunft der Zündenergie und Auslösung der Zündenergie vermag nicht zu befriedigen. Eine Auflistung nach Art der Zündquellen kann nicht alle Aspekte umfassen. Die Schadenschlüssel der Versicherungswirtschaft können ebenso nicht zufrieden stellen, da sie nach Schadenursachen und Schadensentstehungsort differenzieren:

1. Selbstentzündung
2. Explosion
3. Überhitzung
4. Offenes Feuer
5. Elektrizität
6. Menschliches Fehlverhalten
7. Feuergefährliche Arbeiten
8. Brandstiftung
9. Blitzschlag
10. Sonstiges

Und zusätzlich wird unterschieden nach

1. Elektroinstallation
2. elektrische Geräte
3. Feuerungs- und Erhitzungsanlagen
4. Technische Einrichtungen
5. Druckbehälter und Kompressoren
6. Fahrzeuge, Transportanlagen
7. Datenverarbeitungsanlagen
8. Sonstige Orte außer Lagerbereiche
9. Sonstige Orte in Lagerbereichen
10. Unbekannt

Durch Kombination der Ziffern kann ein Zusammenhang von Schadensursache und Schadensort hergestellt werden, der für die Risikoanalyse der Versicherungen sicherlich von großer Bedeutung ist. Es handelt sich also um eine deskriptive Systematik.

Eine bundeseinheitliche Brand- und Feuerwehrstatistik gibt es immer noch nicht, obwohl die Notwendigkeit weitgehend anerkannt ist. Das im Jahre 2002 in Dresden von der vfdb als Basissystem eingeführte statistische Auswerte- und Analyse-System InterSTRES-vfdb (computergestütztes System zur bundeseinheitlichen Brand- und Feuerwehrstatistik; STRES[®] = Statistics of Rescue Services) soll durch einen intelligenten Einsatz statis-

tischer Verfahren am Personalcomputer (PC) zu konkreten Hinweisen führen, wie das System der „nichtpolizeilichen Gefahrenabwehr“ (Feuerwehr, Vorbeugender Brandschutz, technische Hilfeleistung, Rettungsdienst) aufgrund statistischer Aussagen optimiert werden kann. In dem Vorschlag wird unter 31 Tabellen in der Tabelle 9 mit dem Thema „Brandbericht – Quelle der Zündenergie“ nach 76 Quellen differenziert.

Im Folgenden wird daher ein anderes, einfacheres Schema vorgeschlagen, in dem alle Zündquellen und alle Wärmeübertragungsmechanismen in nur vier Gruppen darstellbar sind:

- Zündung durch Einflüsse der Umgebung
- Zündung durch chemische Prozesse
- Zündung durch physikalisch-technische Prozesse
- Zündung durch Selbsterhitzungsprozesse

Brände entstehen nur nach einer Entzündung von brennbarem Material bei Anwesenheit von Sauerstoff, d.h. es muss die Mindestzündenergie an das brennbare Material übertragen werden. Die Zündenergie kann dabei, grob eingeteilt, aus Prozessen der Natur, der Chemie, der Physik und Technik sowie der Biologie entstammen. Diese Einteilung ist Grundlage der nachfolgenden Gliederung

- 4.1 Zündung durch natürliche Prozesse
- 4.2 Zündung durch chemische Prozesse
- 4.3 Zündung durch physikalische Prozesse
- 4.4 Zündung durch Selbsterwärmung und Selbstentzündung

Trotz dieses Systematisierungsversuches wird sich eine stringente Trennung der Themen als nicht gänzlich durchführbar erweisen.

4.1 Zündung durch natürliche Prozesse

4.1.1 Sonneneinwirkung

Die Sonneneinstrahlung Φ_{Σ} (W) führt zur Erwärmung von Oberflächen von Festkörpern entsprechend deren Absorptionsverhaltens. Nach dem Energieerhaltungssatz muss der Strahlungsfluss Φ_{Σ} bei Reflexion Φ_R , Absorption Φ_A und Transmission Φ_T erhalten bleiben

$$\Phi_{\Sigma} = \Phi_R + \Phi_A + \Phi_T$$

Da bei Festkörpern keine Transmission ($\Phi_T = 0$) vorliegt, glasartige Körper ausgenommen ($\Phi_T \neq 0$), gilt immer, dass

$$\Phi_\Sigma = \Phi_R + \Phi_A$$

Führt man die Quotienten aus dem Strahlungsfluss von Reflexion bzw. Absorption und der Gesamtstrahlung Φ_Σ ein, so erhält man die beschreibenden dimensionslosen Größen

$$\text{Reflexionsgrad} \quad \rho = \Phi_R / \Phi_\Sigma$$

$$\text{Absorptionsgrad} \quad \alpha = \Phi_A / \Phi_\Sigma$$

$$\text{Transmissionsgrad} \quad \tau = \Phi_T / \Phi_\Sigma = 0$$

und demzufolge die Regel

$$\rho + \alpha = 1$$

So werden helle Flächen (ρ groß, α klein) nur mäßig erwärmt. Metallisch blanke und darüber hinaus polierte Flächen (Spiegel) weisen eine besonders niedrige Absorption α auf, so dass sie nur eine unbedeutende Erwärmung erfahren. Graue Flächen besitzen eine beachtliche Absorption und erwärmen sich deutlich. Eine schwarze Oberfläche, deren Reflexion zu vernachlässigen ist ($\rho \approx 0$), wird daher den gesamten Strahlungsfluss absorbieren und die höchste Temperatur erreichen, so dass letztere bei direkter Bestrahlung mit ungeschützter Hand nicht mehr berührt werden kann.

Zu beachten ist, dass ρ und α (auch τ) sowohl vom Material als auch von der Wellenlänge der auftreffenden Strahlung abhängen. Ist der Absorptionsgrad $\alpha = 1$, so spricht man vom Schwarzen Körper (siehe Punkt 1.3.1.1).

Später wird noch über den Austausch von Strahlungsleistung von Oberflächen unterschiedlicher Temperatur berichtet. Eine wesentliche Einflussgröße stellt der Emissionsgrad ε der Oberflächen dar, der gerade bei den Infrarotmessungen zu beachten ist; dieser ist dem Absorptionsgrad α gleich zu setzen ($\alpha = \varepsilon$). Diese Werte von ε sind umfangreichen Tabellenwerken zu entnehmen (Beispiele im Tabellenanhang).

Eine deutliche Erwärmung infolge der Sonneneinstrahlung erfolgt auch im Innenraum von Wintergärten und Fahrzeugen bei der Bestrahlung durch die Verglasung hindurch ($\Phi_T \neq 0$); man bezeichnet diese Innenerwärmung auch als Treibhauseffekt. Das Sonnenlicht durchdringt das Glas und wird von den innen liegenden Oberflächen absorbiert, strahlt aber im infraroten Wellenlängenbereich zurück, wobei das Glas keine Transmission in diesem Bereich aufweist. In Wintergärten und Treibhäusern und Passivhäusern wird so durch die Sonneneinstrahlung eine effektive Beheizung des Innenraumes herbeigeführt. Im Sommer sind Temperaturen von etwa 80° C und auch höher unter nicht hinterlüfteten Dachflächen zu erwarten, weil dunkle Dachflächen die Sonnenenergie absorbieren und als Wärmestrahlung in den Innenraum abgeben.

In allen kritischen Fällen ist der Einstrahlungswinkel φ (Winkel zwischen Flächenlot und Einstrahlungsrichtung) zu beachten (siehe unter $\cos\varphi$ -Gesetz), weil naturgemäß die maximale Energieübertragung nur bei senkrechtem Einfall des Sonnenlichtes ($\varphi = 0^\circ$) auf die Absorptionsfläche erfolgt.

Die Sonne strahlt ihre Energie in alle Richtungen gleichmäßig, also isotrop ab. Die abgestrahlte Leistung beträgt etwa $q = 3,9 \cdot 10^{26}$ Watt. Man kann die spezifische Abstrahlung q_S nach dem Stefan-Boltzmann-Gesetz bei senkrechtem Auftreffen auf die bestrahlte Erdoberfläche berechnen

$$q_S = 1,37 \text{ kW m}^{-2} = 1,37 \text{ kJ s}^{-1} \text{ m}^{-2} = 0,137 \text{ W cm}^{-2}.$$

Dieser Wert der spezifischen Strahlungsleistung wird als Solarkonstante bezeichnet und stellt einen langjährigen Mittelwert (gemäß World Meteorological Organization) dar. Dabei sind die Absorption in der Atmosphäre und der variierende Sonnenabstand nicht berücksichtigt. Die Solarkonstante ist also die Strahlungsenergie der Sonne, die pro Zeit und Fläche im Mittel auf der Erde ankäme, wenn es keine Atmosphäre gäbe. Praktisch ist in unseren Breiten mit einer spezifischen Strahlungsleistung von etwa 1.000 Wm^{-2} oder 0.1 Wcm^{-2} zu rechnen, welche auch die Effizienz von solartechnischen Anlagen maßgeblich bestimmt.

Die Sonne strahlt nicht in allen Wellenlängenbereichen mit gleicher Intensität. Die spektrale Verteilung der Sonneneinstrahlung ist nachfolgend dargestellt und zeigt ein Maximum im sichtbaren Bereich, speziell im grünen Spektralbereich.

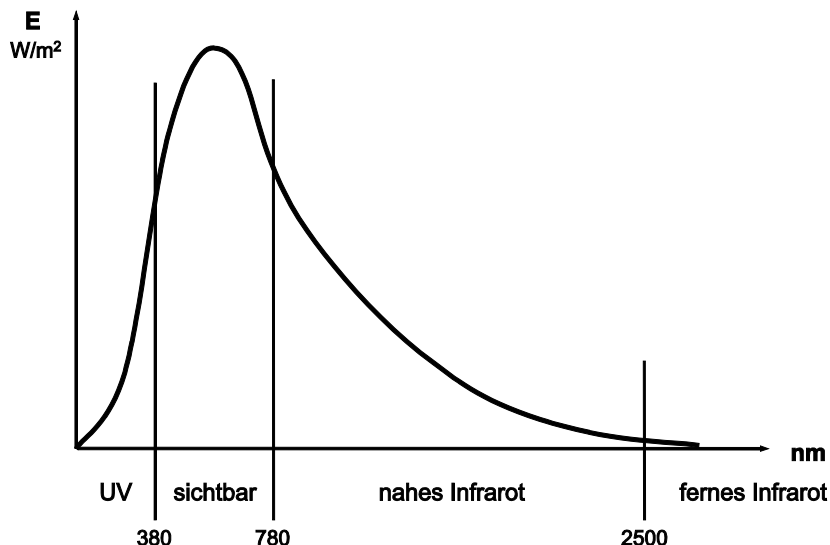


Abb. 1: spektrale Verteilung der spezifischen Leistung der Sonneneinstrahlung

Die Wärmeübertragung bei größeren Einfallswinkeln φ ist geringer als die Situation bei senkrechtem Einfall $\varphi = 0^\circ$. Bei größeren Einstrahlungswinkeln wird die Absorption nach

dem so genannten $\cos\varphi$ -Gesetz reduziert. Bei gegenüber der Einstrahlrichtung geneigten Flächen ($\varphi \neq 0^\circ$) wird der Energieeintrag Q_φ nach folgender Gesetzmäßigkeit reduziert:

$$Q_\varphi = q_s A \alpha \Delta t \cos \varphi$$

wobei q_s die oben angegebene Solarkonstante, A die angestrahlte Fläche, α der Absorptionskoeffizient der angestrahlten Fläche und Δt die Einstrahlungsdauer bedeuten. Deshalb wird in optimierten Solaranlagen ein möglichst senkrechter Einfall der Sonnenstrahlen ($\varphi = 0$) und ein optimaler Absorptionsgrad α angestrebt.

Ein praktisches Beispiel soll die Verhältnisse illustrieren. Bei einer dunkel gestrichenen Platte mit einer Fläche von $0,7 \text{ m} \times 0,7 \text{ m}$ ($\approx 0,5 \text{ m}^2$), die einen Absorptionskoeffizient von zum Beispiel 75 % ($\alpha = 0,75$) besitzt, wird also bei einer relativ steilen Einstrahlung von beispielsweise $\varphi = 15^\circ$ während einer Stunde immerhin ein Energiebetrag von

$$Q_\varphi = 1.782 \text{ kJ} = 0,523 \text{ kWh}$$

aufgenommen, der zur Erwärmung der Platte führt. Daraus erkennt man das große Potential der Energiegewinnung durch Solaranlagen.

Die durch Sonneneinstrahlung somit erreichbaren Temperaturen unter Dächern oder in geschlossenen Fahrzeugen bis 85°C sind an sich noch nicht unmittelbar brandgefährlich, weil die Zündtemperatur der dort vorhandenen Objekte viel höher liegt. Sie können aber sehr wohl Alterungsprozesse an Kunststoffmaterialien verursachen und deren Lebensdauer verkürzen (siehe Punkt 4.3.6.2.1). Mechanische Spannungen lassen sich auch unschwer erzeugen. Chemische und biologische Reaktionen werden begünstigt. In Fahrzeugen können Gasbehälter (Spraydosen, Druckbehälter) so erwärmt werden, dass sie explosionsartig bersten, was als Zerknallen bezeichnet wird. Als Folge wird der brennbare Inhalt freigesetzt. Bei Gasfeuerzeugen ist ein solcher Zerknall des Behälters sehr selten, aber durchaus nachgewiesen. Auch ist daran zu denken, dass die sommerlichen Temperaturen bei weitgehend gefüllten offenen Behältern zu einer solchen Wärmeausdehnung des Inhaltes führen, dass diese überlaufen und somit Dämpfe freigesetzt werden. Solche Überlauferscheinungen sind an randvoll betankten Fahrzeugen zur Sommerzeit zu beobachten.

Befindet sich in einem geschlossenen flüssigkeitsgefüllten Behälter kein Dampfraum, also nicht das geforderte Sicherheitspolster, so ist er gefährlich überfüllt, wobei die inkompressible Flüssigkeit auf Grund der Volumenausdehnung unmittelbar auf die Behälterwandung einwirkt; der Binnendruck kann so ansteigen, dass die Druckfestigkeit des Behälters überschritten wird und ein so genannter Zerknall eintritt. Enthält der Behälter eine brennbare Flüssigkeit (z. B. Propan, Butan, Benzin), so erhöht sich bei Anwesenheit einer Zündquelle die Gefahr eines Brandes oder einer Explosion (siehe Punkt 4.7) außerordentlich.

Die direkte Bestrahlung von Gegenständen auf der Erde führt nur deshalb zu moderaten Temperaturen, weil die Leistungsdichte im Sommer in unseren Breiten deutlich niedriger ist als die Solarkonstante (s. o.). Mit solchen Leistungsdichten kann selbst bei optimaler

Absorption ($\alpha = 1$) keine Temperatur erreicht werden, die der Zündtemperatur brennbarer Materialien entspricht.

Es darf aber nicht unberücksichtigt bleiben, dass manche chemische oder biologische Reaktionen bei solchen mäßigen Temperaturen angestoßen werden können. Zumindest werden alle chemischen Reaktionen gefördert, weil nach dem Gesetz von van t'Hoff bei einer Temperaturerhöhung von nur 10 K mindestens eine Verdoppelung der Reaktionsgeschwindigkeit eintritt. Bei Selbsterwärmungsvorgängen kann somit die anfänglich erforderliche Aktivierungsenergie bereitgestellt werden, so dass die Reaktion gestartet, begünstigt oder beschleunigt wird.

Die spezifische Einstrahlleistung der Sonne kann unschwer erhöht werden, wenn die parallel einfallenden Sonnenstrahlen gebündelt (fokussiert) werden. Dieser Effekt kann mit einer einfachen Sammellinse herbeigeführt werden; damit kann die Strahlungsleistung infolge Brechung im Glas nach dem Snellius'schen Brechungsgesetz so erhöht werden, dass brennbare Materialien (z. B. Papier, Moos, Spreu, Stäube, textiles Material) entflammen oder zumindest glimmen, wenn sie im Brennpunkt (Fokus) der Lichtstrahlen positioniert sind. Solche Sammellinsen werden auch als Vergrößerungslinsen verwendet. Lupen, Lesebrillen und massive Glaskugeln müssen wegen des Fokussierungsproblems vor Sonneneinstrahlung geschützt werden (Abdeckung). Bei den großflächigen Labor-Lupen wird deshalb aus Sicherheitsgründen eine Abdeckung mitgeliefert, die nach der Betriebsanleitung auch benutzt werden muss.

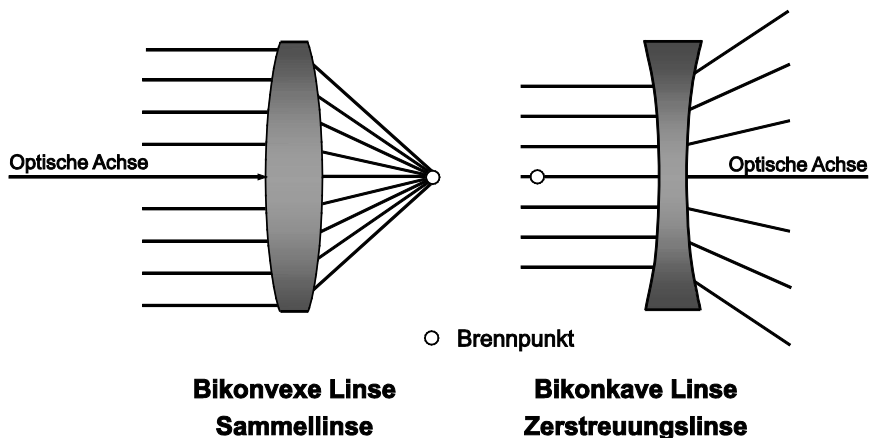


Abb. 2: Parallel-Einstrahlung der Sonne auf eine Sammel- und Zerstreuungslinse

Sammellinsen sind also jene Linsen, die mittig dicker sind als am Rand; deren Oberflächen sind konvex ausgebildet. (z. B. Lesebrille, Lupe), während Zerstreuungslinsen einen dickeren Rand aufweisen, also konkav geformt sind (z. B. Fernbrillen).

Im Fall der Sammellinse werden die parallel verlaufenden Sonnenstrahlen in einem Brennpunkt (BP, auch Fokus) gebündelt, so dass die von der Linse eingefangene Strahlung nur im Bereich des Brennpunktes wirksam wird. Bei den Zerstreuungslinsen werden die Sonnenstrahlen aufgefächert, so dass eine Reduzierung der spezifischen Strah-

lungsleistung auf der Abstrahlseite erfolgt (siehe Abb. 2). Aus diesem Grund können Gläser mit Lufteinschlüssen (z. B. Dachziegel aus Glas) als hintereinander gereihete Zerstreuungslinsen aufgefasst werden, die keinesfalls eine Fokussierung herbeiführen können. Solche Gläser werden also nie als Brandursache in Frage kommen.

Eine ähnliche Sammelwirkung wie die Sammellinse besitzt der Hohlspiegel, dessen Oberfläche konkav geformt ist (so genannter Vergrößerungsspiegel) und einen hohen Reflexionsgrad ρ aufweist. Wenn spiegelnde oder reflektierende Oberflächen konkav geformt sind und ein entsprechendes Reflexionsverhalten aufweisen (polierte konkave Metalloberflächen, Milchkannendeckel, reflektierende Werbeschilder und Fassadenverkleidungen), dann kann ein fokussierender Hohlspiegeleffekt herbeigeführt werden und im Fokus eine ungewollte Erwärmung eintreten. Immerhin lassen sich mit solchen konkav geformten Reflektoren in einsamen Gegenden auch Kochgeräte realisieren.

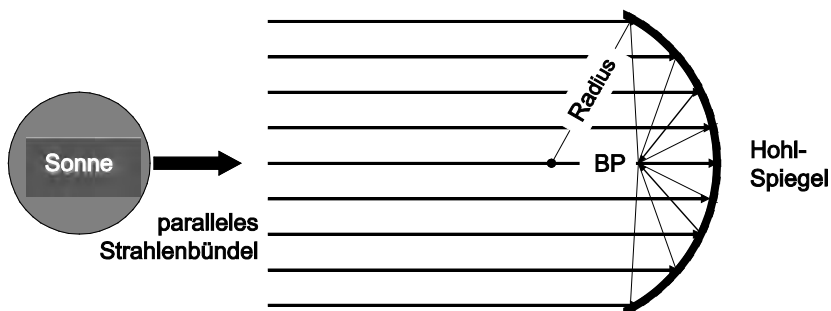


Abb. 3: Paralleleinstrahlung der Sonne auf einen Hohlspiegel

Bei allen fokussierenden Vorrichtungen ist die erzielbare Strahlungsdichte am Ort der auftreffenden Strahlung zu ermitteln und die relative Lage von Objekt und Brennpunkt (Fokus) zu beachten, um nachzuweisen, ob eine kritische Strahlungsenergie übertragen worden sein kann. Wird dieser oberflächenspezifische kritische Wert nicht erreicht, können eben nur thermische Schäden (Schmelzungen, Verformungen, Versengungen), aber kein Brand herbeigeführt werden.

Sammellinsen oder Hohlspiegel können eine Erhöhung der spezifischen Leistung bis deutlich über den Faktor 10 bewirken. Damit ergibt sich aus der Solarkonstanten eine spezifische Leistung von nunmehr ca. $\geq 1,0 \text{ W cm}^{-2}$, die bei lang anhaltender Belastung bei empfindlichen Oberflächen als brandkritisch zu bewerten ist. Der Trivialversuch mit einer auf Papier gerichteten Sammellinse stellt mit der raschen Entflammung des Papiers dies unter Beweis. Physikalisch heißt dies nichts anderes, als dass durch Fokussierung der Sonnenstrahlung auf die Oberfläche eines brennbaren Materials dessen Pyrolyse- oder Zündtemperatur erreicht wird.

Beispiele sind die Entzündung z. B. von Vorhängen, Papieren oder Isolierstoffen und anderen faserigen Materialien in Baderäumen durch ungünstig positionierte Vergrößerungsspiegel (Kosmetikspiegel) oder die Inbrandsetzung von Trocknungsgestellen durch konkav geformte Milchkannendeckel oder Brände unter nicht abgedeckten Laborlupen oder unter oder hinter massiven dekorativen Glaskugeln. Es gibt im Einzelfall auch Gefährdungen durch den Sammellinseneffekt von Nah-Brillen (Plus-Dioptrien) oder von Fadenzählern, Lupen u. ä.

Die Inbrandsetzung durch Sonnenbestrahlung ist nicht häufig, weil für einen Zünderfolg nicht nur die Fokussierung durch eine Sammellinse oder einen Hohlspiegel erfolgen muss, sondern gleichzeitig eine Positionierung des entzündlichen Materials möglichst genau im Brennpunkt (Fokus) der Sammellinse oder des Hohlspiegels erforderlich ist. Auch die Eigenschaften des bestrahlten Materials werden den Zünderfolg bestimmen. Wegen der Erddrehung scheint die Sonne von Osten nach Westen zu wandern, so dass sich der Einfallswinkel φ entsprechend der Erdrotation ständig ändert und so auch die Einwirkungsdauer der fokussierten Sonnenstrahlen natürlich begrenzt ist.

Fokussierungseffekte an Bruchstücken von geformten Glasbehältern werden häufig kritiklos unterstellt. Scherben aus dem Wandbereich von Flaschen bewirken aber keine Fokussierung; aber es kann nicht ausgeschlossen werden, dass ein Bruchstück mit unterschiedlichem Dickenverlauf, z. B. aus dem Übergangsbereich von Wand zu Boden oder an Teilen der Bodeneinziehung von Weinflaschen oder an geformten Industriegläsern, einen Sammellinseneffekt aufweist. Es gibt auch Glasbausteine, die auf Grund der extremen dekorativen Oberflächengestaltung fokussierend und deshalb brandzündend wirken.

Die Art der Zündung infolge eines Fokussierungseffektes wird gelegentlich unkritisch akzeptiert, weil die erforderlichen Randbedingungen nicht sorgfältig geprüft werden. Mit einer auf diese Weise verkürzten Analyse kann eine vorsätzliche oder fahrlässige Inbrandsetzung untergehen, was z. B. bei Waldbränden zu beachten ist. Hier gibt es zahlreiche Zündalternativen (s. 4.1.4), die Gegenstand eines genauen Eliminationsverfahrens sein müssen.

4.1.2 Klima- und Umgebungsbedingte Einflüsse

Das Wetter kann nicht direkt mit einer Brandzündung in Zusammenhang gebracht werden, lässt man den Blitzschlag außer Acht (siehe Punkt 4.1.3). Das Wetter lässt sich durch Temperatur, relative Feuchte, Regen, Wind, Wind- und Luftdruck beschreiben.

Diese physikalischen Einflüsse sind im Sinne einer Brandzündung ohne Bedeutung, können aber Vorschäden bewirken, so dass eine andere Brandursache brandwirksam werden kann; sie können vor allem brennbare Gegenstände in ihrer Zündneigung ganz entscheidend verändern.

Durch entsprechende Temperaturschwankungen $\Delta\vartheta$, entweder bei hohen Außentemperaturen oder bei Minustemperaturen oder bei Hitzebeanspruchungen während eines Brandes, entstehen zwangsläufig Längenänderungen $\Delta l = l_g - l_0$ in **festen Körpern**, deren Ausmaß vom linearen Ausdehnungskoeffizienten α abhängen.

$$l_g = l_0 (1 + \alpha \Delta\vartheta)$$

Dieses Gesetz gilt für die lineare Ausdehnung fester Körper und Flüssigkeiten, wobei α geringfügig temperaturabhängig ist ($\vartheta > 100\text{ °C}$). Würde man z. B. einen Kupferwürfel von einer Kantenlänge von 1 cm bei einer Temperaturzunahme von 80 °C daran hindern, sich auszudehnen, müsste an den gegenüberliegenden Flächen eine Kraft von 13.000 N einwirken, was einer Last von 1,3 Tonnen entspricht. Oder anders formuliert, der Kupferwürfel entwickelt eine solche Sprengkraft, die der Last von 1,3 Tonnen entspricht. Zu beachten ist, dass sich der Ausdehnungskoeffizient mit zunehmender Temperatur ($\vartheta > 100\text{ °C}$) vergrößert, wie Tabellenwerken zu entnehmen ist.

So werden auch Relativbewegungen von verbundenen Materialien mit unterschiedlichen thermischen Ausdehnungseigenschaften erzwungen. Dies kann zu direkten mechanischen Schäden führen. Bei Stahlbetonkonstruktionen ist daher das Abplatzen von Betonüberdeckungen von Bewehrungsstahl insbesondere bei hohen Brandraumtemperaturen sehr häufig zu beobachten, abgesehen von explosionsartigen Absprengungen infolge des brandbedingten Binnendampfdrucks des physi- wie chemisorbierten Wassers im Zementstein bei Brandbeginn und mäßigen Brandraumtemperaturen. Auch intensive Abkühlmaßnahmen, z. B. mittels Löschwasser, können in Materialien mit geringem Wärmeleitvermögen zu starken schädigenden Temperaturgradienten führen. Es sind auch Risse in an sich abzudichtenden Flächen zu beachten, die z. B. im Fall von Rauchgasrohren oder Behältern zu gefährlichen Zuständen führen können. Auch können so erhebliche Bewegungen von Mauern und Konstruktionsteilen entstehen, dass eine Brandabschottung unwirksam oder die Feuerwiderstandsdauer reduziert wird und sich so ein Brand ausweiten kann. Andererseits geben solche Schäden auch Hinweise auf die erzielten Temperaturen und sind bei der Feststellung der Brandursache hilfreich.

Eine technische Anwendung des unterschiedlichen Ausdehnungsverhaltens von Metallen (Zink/Stahl, Messing/Stahl) besteht in der Funktionsweise eines Bimetallschalters, der zur Regelung oder Begrenzung von Prozesstemperaturen häufig Verwendung findet und in Zusammenhang mit der Gefahr von Übererwärmung im Brandfall von Bedeutung ist. Bimetalle werden auch in Leitungsschutzschaltern eingesetzt und schützen vor Überlastung der nachgeschalteten Betriebsmittel (siehe Punkt 4.3.6.3.3). Auch Temperaturanzeigen lassen sich durch die unterschiedliche Längenausdehnung der verbundenen Metalle realisieren.

Die Flächenänderung ΔA von festen Körpern ergibt sich aus der zweidimensionalen linearen Änderung zu $\Delta A = l_2^2 - l_1^2$ oder unter Berücksichtigung des linearen Ausdehnungskoeffizienten α zu

$$\Delta A = A_1 2 \alpha \Delta \vartheta$$

$$\Delta A = A_1 (1 + 2 \alpha \Delta \vartheta)$$

Durch Ausdehnung von festen Körpern entsteht zwangsläufig auch eine Vergrößerung des Volumens, das als dreidimensionale Längenänderung verstanden wird,

$$\Delta V = V_1 3 \alpha \Delta \vartheta$$

$$V_2 = V_1 (1 + 3 \alpha \Delta \vartheta) = V_1 (1 + \beta \Delta \vartheta)$$

wobei der in Tabellen angeführte kubische Ausdehnungskoeffizient β

$$\beta \approx 3 \alpha$$

entspricht. Hohlräume sind nach dem gleichen Gesetz zu behandeln.

Der kubische Ausdehnungskoeffizient von **Flüssigkeiten** γ ist größer (etwa Faktor 100) als derjenige der festen Körper:

$$V_2 = V_1 (1 + \gamma \Delta \vartheta)$$

Der Ausdehnungskoeffizient γ ist geringfügig temperaturabhängig. Im Intervall von 0 °C bis 40 °C sind Tabellenwerte hinreichend genau.

Beim Zerknall von flüssigkeitsgefüllten Behältern wird dieser Effekt offenkundig. Die Umhüllung (Gefäß, Rohr, Flasche) dehnt sich als fester Körper mit zunehmender Temperatur zwar auch aus, aber wegen der größeren Ausdehnung der inkompressiblen Flüssigkeit entsteht zwangsläufig ein gefährlicher Binnendruck, der zum Zerknall des Behälters führen kann. Die damit einhergehende Freisetzung von brennbaren Flüssigkeiten stellen bei Anwesenheit einer Zündquelle eine besondere Brand- und Explosionsgefahr dar. Auf das Phänomen BLEVE ist zu verweisen (siehe Punkt 4.7).

Fast alle Stoffe haben einen positiven Ausdehnungskoeffizienten, das bedeutet, dass sich das Volumen monoton mit zunehmender Temperatur vergrößert. Bei Wasser ist aber ein anomales Verhalten zu beobachten, das als Anomalie des Wassers bekannt ist.

Der Ausdehnungskoeffizient verändert sich mit der Temperatur sehr stark und ist zwischen 0 °C und 4 °C negativ. Bei 4 °C besitzt das Wasser seine größte Dichte, weshalb in Seen die Eisdecke nicht bis zum Grund reichen kann. Die Temperaturabhängigkeit der Dichte von Wasser ist Tabellen zu entnehmen. Bei 0 °C gefriert Wasser und erleidet eine sprunghafte Zunahme des Volumens, d.h. die Dichte nimmt ab, so dass Eis im Wasser schwimmt. Mit weiter abnehmender Temperatur erfolgt eine zunehmende Volu-

menvergrößerung. Somit besitzt eingeschlossenes und gefrierendes Wasser ($\vartheta < 0\text{ °C}$) eine erhebliche Sprengwirkung, so dass Folgeschäden eintreten können.

Diese Anomalie des Wassers kennt man bei winterlichen Felssprengungen durch Eis und beim natürlichen Zerkleinern der Ackerkrume. Das in Wasserleitungen gefrorene Wasser kann Rohre aufplatzen oder Endkappen absprenge lassen, was beim anschließenden Auftauen zu Problemen unterschiedlichster Art führen kann, wie z. B. zu Überschwemmungen oder zur Benässung von technischen Einrichtungen wie Stromeinrichtungen.

In Anlagen, wo die Zirkulation (z. B. Heizanlagen) oder die Ableitung von Wasser (z. B. Kondensatsammler) eine zwingende technische Notwendigkeit ist, können auch nur in einem eng begrenzten Rohrabschnitt eingefrorene Rohrleitungen ein erhebliches Sicherheitsrisiko darstellen. Zu denken ist an Folgen wie Überhitzungen in Wasseraufbereitungsanlagen und Drucküberhöhungen, die zu Folgeschäden an verschiedensten technischen Geräten führen. Auch zugefrorene Kondensatabscheider oder Siphons können Gefahrenzustände herbeiführen. Als Folge kann sogar ein Zerknall von Behältern eintreten, der Schäden wie bei einer Raumexplosion herbeiführen kann.

Über die mit dem Auftauen von eingefrorenen Rohren oder Behältern mit offenen Flammen oder mit Strom verbundenen Gefahren wird an anderer Stelle berichtet (siehe Punkt 4.2.2, 4.3.6.2.3).

In den Fällen, wo die erhöhte Temperatur zu einem Vorschaden führen kann, der später brandrelevant wird, sind auch Volumen- und Druckänderungen von Flüssigkeiten immer zu beachten und abzuschätzen.

Die Anomalie des Wassers lässt sich auch als Veränderung des Volumens grafisch darstellen, wie im folgenden Diagramm gezeigt (siehe Abb. 4).

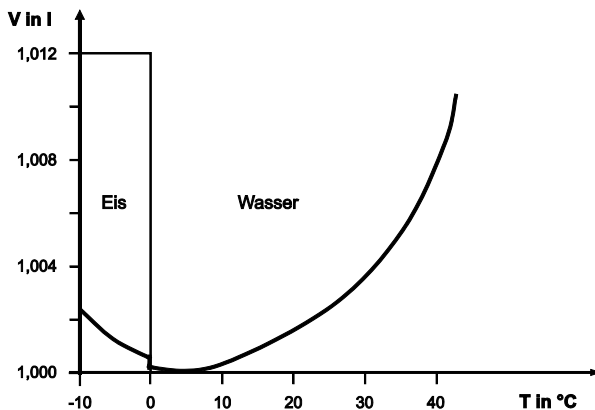


Abb. 4: Temperaturabhängigkeit des auf 4 °C bezogenen Volumens von Wasser und von Eis, Anomalie des Wassers

Beim Erwärmen von Flüssigkeiten nimmt deren Volumen zu und damit deren Dichte ab, da Volumen V und Dichte ρ umgekehrt proportional sind:

$$\rho_1 V_1 = \rho_2 V_2$$

Es gilt außerdem der Zusammenhang

$$\rho_2 = \rho_1 / (1 + \gamma \Delta\vartheta)$$

Diese Gleichung gilt übrigens auch für feste Körper, wenn der Volumenausdehnungskoeffizient γ durch $\beta = 3\alpha$ ersetzt wird. Bei Abkühlung ist $\Delta\delta$ negativ.

Bei **Gasen** ist zu berücksichtigen, dass ihr Volumen vom Druck p und von der Temperatur ϑ abhängig ist. Gegenüber Flüssigkeiten sind Gase aber kompressibel, d.h. durch Druck können sie verdichtet werden. Es ist daher eine getrennte Behandlung für konstanten Druck ($p = \text{const}$) und für konstante Temperatur ($\vartheta = \text{const}$) durchzuführen. Außerdem gelten die nachfolgenden Gesetzmäßigkeiten nur streng für ideale Gase, die nach Boyle-Mariotte mit

$$p V = \text{const}$$

beschrieben werden können. Für nichtideale Gase ist auf die Fachliteratur zu verweisen. Für viele überschlägige Berechnungen kann aber von idealen Gasen ausgegangen werden.

Wird der Druck während der Erwärmung konstant gehalten, so nimmt das Gasvolumen V_ϑ wie folgt auf den Wert V_0 zu:

$$V_\vartheta = V_0 (1 + \gamma \vartheta) \quad p = \text{const}$$

Der Volumenausdehnungskoeffizient γ eines Gases ist

$$\gamma = 0,003661 \text{ K}^{-1} = 1 / 273,15 \text{ K} = 1 / T_0$$

Der Volumenausdehnungskoeffizient bezieht sich auf das Volumen V_0 bei $0 \text{ }^\circ\text{C}$; das Volumen V_ϑ stellt das Gasvolumen bei der Temperatur ϑ dar. Der Koeffizient γ gilt auch für Edelgase, Wasserstoff und Sauerstoff, ist für andere Gase dem Tabellenwerk zu entnehmen.

Aus dem kubischen Ausdehnungsgesetz kann bei konstantem Druck ein Zusammenhang zwischen Volumen und Temperatur wie folgt abgeleitet werden:

$$V_1 T_2 = V_2 T_1 \quad \text{oder} \quad V \sim T \quad p = \text{const}$$

oder auch ausgedrückt durch die Dichte ρ

$$\rho_1 T_1 = \rho_2 T_2 \quad \text{oder} \quad \rho T = \text{const} \quad p = \text{const}$$

Dieses Gesetz ist das 1. Gesetz von *Gay-Lussac*. Es gilt für ideale Gase, für reale Gase nur in guter Näherung und für Dämpfe nicht.

Beim Erwärmen bei konstantem Volumen V erfolgt wegen der Ausdehnung eine Druckzunahme Δp ; zumindest für ideale Gase gilt

$$p_g = p_0 (1 + \gamma \vartheta) \qquad V = \text{const}$$

Der Spannungskoeffizient eines idealen Gases γ_{ideal} bei 0° C beträgt, wie oben,

$$\gamma_{ideal} = 0,003661 \text{ K}^{-1}$$

Er bezieht sich auf den Druck p_0 bei 0 °C ($T = 273,15 \text{ K}$).

Bei einer Temperaturerhöhung um 1 Grad nimmt also der Druck eines Gases um $1/273,15$ seines Druckes bei 0 °C zu, wenn bei der Erwärmung das Volumen unverändert bleibt ($V = \text{const}$).

Durch Berechnung der Drücke p_1 und p_2 bei unterschiedlichen Temperaturen T_1 und T_2 ergibt sich das 2. Gesetz von *Gay-Lussac*

$$p_1 T_2 = p_2 T_1 \quad \text{oder} \quad p \sim T \qquad V = \text{const}$$

Der Druck eines eingeschlossenen Gases ($V = \text{const}$) ist somit proportional zur absoluten Temperatur T . Dieses Gesetz gilt streng nur für ideale Gase, in guter Näherung für reale Gase, aber nicht für Dämpfe.

Die Gesetze von *Gay-Lussac* und von *Boyle-Mariotte* können zusammengefasst werden. Daraus ergibt sich die Zustandsgleichung des idealen Gases zu

$$p_1 V_1 / T_1 = p_2 V_2 / T_2$$

oder allgemein

$$p V / T = \text{const}$$

In Worten ausgedrückt bedeutet dieses Gasgesetz, dass bei einer bestimmten Menge eines Gases das Produkt aus Druck und Volumen, dividiert durch die absolute Temperatur, konstant ist. Dabei ist p der absolute Druck, nicht der Überdruck. Die Einschränkung für nicht ideale Gase und Dämpfe gilt auch hier.

Diese drei Größen führen auch zu drei Sonderfällen, die mit einem spezifischen Adjektiv bezeichnet werden (nachfolgende Tabelle: 2. Spalte). Diese Begriffe sind für das Verständnis vieler verfahrenstechnischer Prozesse von Bedeutung:

Bedingung	Bezeichnung	Gesetz	Bez. des Gesetzes
$p = \text{const}$	isobar	$V_1 T_2 = V_2 T_1$	1. Gay-Lussac
$V = \text{const}$	isochor	$p_1 T_2 = p_2 T_1$	2. Gay-Lussac
$T = \text{const}$	isotherm	$p_1 V_1 = p_2 V_2$	Boyle-Mariotte

In der Zustandsgleichung ist der Quotient pV/T proportional der Masse m des eingeschlossenen Gases

$$p V T^{-1} \sim m$$

$$p V = m R_i T$$

wobei m die Masse in kg, R_i die spezielle Gaskonstante in $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$, und T die Temperatur in K und der Druck p in $\text{J m}^{-3} = \text{Pa}$ ist, so dass sich das Produkt pV in der Dimension einer Arbeit (in Joule = Js) darstellt. Die spezielle Gaskonstante R_i ist den Tabellen zu entnehmen.

Die Dichte eines Gases hängt vom Druck und der Temperatur ab. Man kann sie den Tabellen entnehmen, wobei sich die Angaben auf die Normdichte bei einem Umgebungsdruck von 101,325 kPa und bei der Temperatur von 273,15 K beziehen. In Kenntnis der o.a. Zustandsgleichungen der Gase lässt sich die Dichte auf den jeweiligen Zustand umrechnen nach

$$\rho_2 = \rho_1 (T_1 p_2 / T_2 p_1)$$

oder auch allgemeiner

$$\rho = \rho_n (T_n p / T p_n)$$

Die Dichte ρ lässt sich berechnen zu

$$\rho = p / R_i T$$

wobei mit R_i als individuelle Gaskonstante den Tabellen zu entnehmen ist,

oder im Fall der Normdichte ρ_n zu

$$\rho_n = p_n / R_i T_n$$

wobei p_n der Normdruck (1.013,25 hPa) und T_n die Normtemperatur (273,15 K) und R_i die individuelle Gaskonstante (aus Tabellen zu entnehmen) in $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ ist.

Das Normvolumen ist das Gasvolumen im Normzustand. Benötigt man das Volumen bei anderen Prozess-Bedingungen, so kann man dieses wie folgt berechnen

$$V_n = V (T_n p / T p_n)$$

dabei bedeutet V das Volumen bei p und T und die indizierten Größen jeweils die genannten Normwerte.

Bei Gasgemischen kann nicht mit dem arithmetischen Mittel gerechnet werden. Vielmehr gilt die Beziehung für unterschiedliche Gase

$$\rho_m = (\rho_1 V_1 + \rho_2 V_2 + \dots) / (V_1 + V_2 + \dots)$$

und in analoger Weise für die individuelle Gaskonstante R_{im}

$$R_{im} = (R_1 m_1 + R_2 m_2 + \dots) / (m_1 + m_2 + \dots)$$

Verflüssigte Gase können nur verdampfen, wenn ihnen die Verdampfungswärme Q_v (J) zugeführt wird. Dadurch erfolgt eine Phasenumwandlung von flüssig nach gasförmig. Die hierfür benötigte Energie heißt Verdampfungswärme, die beim Kondensieren des Dampfes als Kondensationswärme Q_{kond} wieder frei wird. Wird diese auf die Masse m in kg bezogen, so bezeichnet man sie als spezifische Verdampfungswärme r in J/kg

$$r = Q_v / m$$

Die spezifische Verdampfungswärme r beschreibt also die Wärmemenge Q_v , die für die Verdampfung von 1 Kilogramm einer Flüssigkeit erforderlich ist oder die bei der Kondensation frei werdende Wärmemenge Q_{kond} . Die Temperatur bleibt dabei unverändert.

Die für die Verdampfung erforderliche Energie berechnet sich nach

$$Q_v = r m$$

wobei zu berücksichtigen ist, dass die spezifische Verdampfungswärme r mit steigendem Druck p kleiner wird. Aus den Tabellen kann man die Werte bei Normaldruck entnehmen.

Wird also z. B. Flüssiggas in Druckflaschen erwärmt, um das Gas aus dem Behälter zu entnehmen, muss die Flüssigkeit bis zum Siedepunkt erwärmt werden (Umgebungstemperatur reicht hier aus) und zusätzlich die Verdampfungsenergie zugeführt werden. Sie wird in der Regel der Umgebung entnommen. Beim Verdunsten von Flüssigkeiten ($\vartheta < \text{Siedetemperatur}$) wird die erforderliche Wärmemenge meistens der Flüssigkeit selbst entnommen, weshalb sich diese abkühlt und als Verdunstungskälte spürbar wird.

Der Inhalt von Behältern mit Flüssiggas (Propan, Butan) kann nur durch Wägung festgestellt werden, weil das oberhalb der Flüssigphase im Gleichgewicht befindliche Gasvolumen einen nur von der Temperatur abhängigen Dampfdruck aufweist. Wird Gas entnommen, so muss eine Nachverdampfung erfolgen, deren Energie dem Flüssiggas selbst und dem Behälter entnommen wird, wodurch sich beide abkühlen. In der Regel ist die Gasentnahme so moderat, dass die Abkühlung durch die Umgebungstemperatur oder die Sonneneinstrahlung kompensiert werden kann.

Niedrige Außentemperaturen mindern die Nachverdampfung von verflüssigten Brenngasen. Bei hoher Gasentnahme ist die Abkühlung des Flüssiggases so stark, dass sich an den Druckflaschen als sichtbares Zeichen Reif niederschlägt und so gelegentlich den Füllstand signalisieren kann. Bei extremer Gasentnahme kann das Flüssiggas fest werden, so dass keine Nachverdampfung mehr erfolgt; daraus wird gelegentlich fälschlich und gefährlich auf eine Totalentleerung der Druckflasche geschlossen. Bleibt deshalb das Entnahmeventil bei diesem Zustand geöffnet und tritt bei zeitverzögerter Wiedererwärmung erneut eine Nachverdampfung ein, so dass Gas frei wird, so kann sich dieses an offenen Flammen oder Schaltfunken entzünden, wobei sich ein Brand oder eine Explosion anschließt.

In der atmosphärischen Luft befindet sich immer **Wasserdampf**. Der Gehalt schwankt örtlich und zeitlich und wird als Luftfeuchtigkeit (Luftfeuchte) f bezeichnet. Bei jeder Temperatur kann in einem bestimmten Luftvolumen nur eine maximale Menge an Wasserdampf gespeichert sein. Dabei entspricht der Partialdruck des Dampfes dem temperaturabhängigen Sättigungsdampfdruck; die zugehörige maximale Feuchte f_{max} ergibt sich aus dem Quotienten aus maximaler Wasserdampfmasse m_{max} in der Luft und dem Volumen V_{feucht} der feuchten Luft

$$f_{max} = m_{max} / V_{feucht} \quad (\text{kg m}^{-3}) \quad \text{oder meist} \quad (\text{g m}^{-3})$$

Meistens enthält aber die Luft weniger Wasserdampf als maximal aufgenommen werden könnte, das heißt, die Sättigungsmenge wird nicht erreicht. Hierfür gibt es die Beschreibungsgrößen *absolute* und *relative* Feuchte:

absolute Feuchte:

$$f = \frac{\text{wirklich enthaltene Wasserdampfmasse } m}{\text{Volumen der feuchten Luft}} \quad \text{g m}^{-3}$$

relative Feuchte:

$$\varphi = \frac{\text{absolute Feuchte } f}{\text{maximale Feuchte } f_{max}} \quad \text{dim.-los}$$

$$\text{oder} \quad \varphi = 100 f / f_{max} \quad \%$$

Da die maximale Feuchte f_{max} eine Funktion der Temperatur ist, ändert sich auch die relative Feuchte φ , auch wenn die absolute Feuchte f unverändert bleibt. Wird die Temperatur abgesenkt, so steigt die relative Feuchte φ auf 100 %; diese Temperatur nennt man Taupunkt. Am Taupunkt erfolgt eine Kondenswasserbildung bzw. der Niederschlag von Tau oder es entsteht an den Kondensationskeimen in der Luft Nebel.

Für die Sicherheit elektrischer Anlagen ist das Erreichen des Taupunktes kritisch, weil Kriechströme induziert werden (siehe Punkt 4.3.6.2.1). Das kann schon bei nächtlicher Abkühlung erfolgen. Bei elektrostatischer Aufladung kann dagegen die Erhöhung der relativen Feuchte $\varphi > 50\%$ das Ableiten von gefährlichen Überschussladungen begünstigen (siehe Punkt 4.3.5).

Die relative Luftfeuchte φ spielt einerseits eine Rolle bei der Entzündbarkeit bzw. Entflammbarkeit von brennbaren Materialien, indem die bei niedriger relativer Luftfeuchte im Feuchtegleichgewicht befindlichen Materialien sehr leicht oder eben bei hohem Feuchtegehalt sehr schwer zu entzünden sind. Dies gilt insbesondere bei Materialien mit hohem Dispersionsgrad, weil hier eine große Oberfläche zur Adsorption von Wasser zur Verfügung steht.

Holz ist ein wichtiger Baustoff für Gebäude und Möbel und damit auch ein wichtiger Brandstoff. Im Brandfall ist das Brandverhalten von Holz in besonderer Weise zu berücksichtigen, da brandbedingte Veränderungen am Holz wertvolle Hinweise liefern.

Bei Holz wird der Heizwert ganz maßgeblich vom Wassergehalt bestimmt. Der Wassergehalt in % ist der Anteil des Wassers an der Gesamtmasse. Der Heizwert ergibt sich aus dem Heizwert der Trockenmasse vermindert um die soeben behandelte Verdampfungswärme des Wasseranteils. Dieser Sachverhalt ist im folgenden Diagramm beispielsweise für waldfrisches Holz dargestellt.

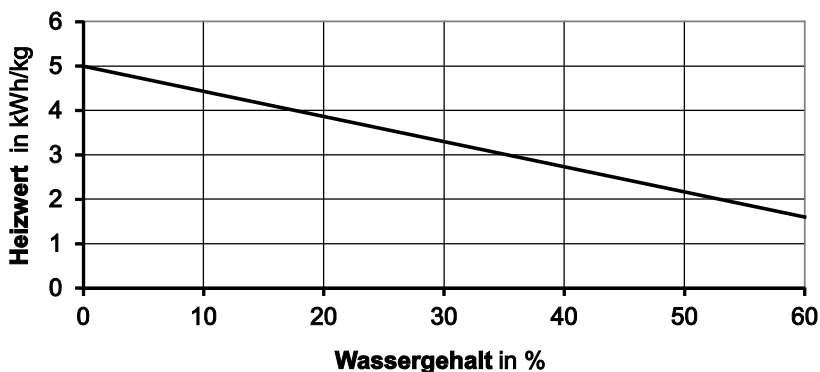


Abb. 5: Heizwert von Holz in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt

Bei Änderung der relativen Feuchte φ in der Umgebungsluft passt sich der Wassergehalt (Holzfeuchte) so lange an, bis der Dampfdruck an der Holzoberfläche mit dem der umgebenden Atmosphäre übereinstimmt. Ist der stationäre Zustand erreicht, spricht man von Holzgleichsfeuchte, die sich bei einer bestimmten Temperatur und einer bestimmten relativen Luftfeuchte einstellt. In Wohnräumen beträgt der Wassergehalt von Holz bei 20 °C und $\varphi = 60\%$ etwa 11% .

Unter trockenem Holz versteht man nach DIN 4074-1 Holz mit einer Holzfeuchte unter 20 %. Der Wassergehalt des Holzes bestimmt die Entflammbarkeit und das Abbrandverhalten ganz wesentlich.

Bei elektrischen Isolierstrecken spielt die Feuchtigkeit, insbesondere wenn eine Taupunktunterschreitung ($\varphi = 1$) vorliegt, eine besondere Rolle, weil Kriechströme auftreten können, die bei Schmutz- und Staubablagerungen oder beim Vorhandensein von stromleitenden Flüssigkeiten oder kondensierten Dämpfen besonders schadenswirksam werden können (siehe Punkt 4.3.6.2.1: dort insbesondere 10.). Diese Kriechströme selbst können brandzündend wirken; es kann aber auch zu einem Lichtbogenüberschlag kommen (siehe Punkt 4.3.6.2.3: 1.).

Die relative Feuchte beeinflusst auch stark den Oberflächenwiderstand von elektrischen Isolierstoffen und bestimmt damit auch das Ableitvermögen von Ladungen und somit die von elektrostatischen Aufladungen ausgehenden Gefahren (siehe Punkt 4.3.5). Eine der Schutzmaßnahmen gegen statische Aufladungen ist deshalb die Erhöhung der relativen Luftfeuchte φ über 50 %.

Das Eindringen von Regen in elektrische Betriebsmittel kann das Entstehen von erheblichen Fehlerströmen und die Zündung von Lichtbögen begünstigen, weil schon Taupunktunterschreitungen brandgefährlich werden können. Auch auf die Gefahr eines Stromschlags durch Spannungsverschleppung ist hinzuweisen.

Mit Wasser können auch chemische Reaktionen als Selbsterwärmungsprozesse entstehen (siehe Punkt 4.2.1.4, 4.3.8). Ein bekanntes Beispiel ist das Benässen von ungelöschtem Kalk oder das so genannte Löschen von Branntkalk (CaO).

Auch Erntegut und Holzmehl kann bei hohem Wassergehalt, also bei ungenügender Trocknung durch biologische (siehe Punkt 4.4.1) und chemische (siehe Punkt 4.2.1) Reaktionen insofern in einen kritischen Zustand übergeführt werden, der zur Selbsterwärmung führt (siehe Punkt 4.4). Aber auch beim Wiederbefeuchten von gelagertem Erntegut infolge einer Reaktivierung der Selbsterwärmungsprozesse kann eine solche Selbsterwärmung herbeigeführt werden, wenn der Nährwert des Ernteguts noch hinreichend hoch ist, also das Erntegut noch hinreichend frisch und als Nahrung geeignet und wertvoll ist (siehe Punkt 4.4.1). Bei jahrelanger Lagerung ist der Nährwert von Erntegut so abgesenkt, dass der Selbsterwärmungsprozess verhindert wird.

Die Einwirkung von **Wind** und insbesondere von Wind-Böen kann zu mechanischen Belastungen führen, als deren Folge brandkritische Zustände herbeigeführt werden. Hier ist an einen zeitweiligen Kontakt des Bewuchses mit Stromleitungen zu denken (siehe Punkt 4.3.6.2.3: 6.), wodurch infolge des fließenden Fehlerstroms biologisches Material entzündet werden kann oder Funkenflug provoziert wird, der windbedingt über große Strecken erfolgen kann. Der Wind kann auch zu Berührungen der Seile der Freileitungen führen, wodurch Kurz- und Erdschlüsse (siehe Punkt 4.3.6.2.3: 5. und 6.) entstehen und erhitztes und sogar verflüssigtes Leitungsmaterial in die Umgebung getragen wird (siehe Punkt 4.3.6.2.3: 2.). Holz- und Stahlgittermasten können bei hohem Winddruck beschädigt oder umgeknickt werden, so dass erhebliche Erd- und Kurzschlussströme fließen und Lichtbogen gezündet werden (siehe Punkt 4.3.6.2.3: 1.). Auch Gasversorgungsein-

richtungen können bei entsprechendem Winddruck gefährdet sein, wobei sie häufig unterirdisch verlegt und damit geschützt sind.

Wind kann ein bereits bestehendes Feuer durch Zufuhr von Luftsauerstoff anfachen (siehe Punkt 4.2.1.2). Er kann auch zu Funkenflug führen (siehe Punkt 4.3.2), der sich dann erst in der entfernteren Umgebung als Gefahrenzustand darstellt. Dies gilt für offene Feuerstätten, Funkenaustritt aus Schornsteinen als auch gerade für Brände in Wäldern oder in der Heide. Sekundäre Brandstellen im Freien sind daher bezüglich des Windeinflusses genauer zu untersuchen, zumal ein brandzündender Funkenflug auch schon über Hunderte Meter nachgewiesen werden konnte, der bei Waldbränden auch noch erheblich erweitert werden kann.

Leichte brennbare Materialien, wie Tücher, Heu, Stroh, Sägemehl oder Papiere können in Windrichtung über weite Strecken transportiert werden. Dabei können diese Teile Kontakt erhalten mit Zündquellen, wie heiße Oberflächen oder Leuchten mit hoher Leistungsaufnahme. Eine solche Situation ist äußerst schwer zu rekonstruieren.

Wind kann auch brennendes Material bei entsprechendem Auftrieb sogar als Stückgut über weite Strecken transportieren, so dass dieses in Kontakt mit anderen brennbaren Materialien gelangt und so ein sekundärer Brand gezündet wird, der auch weiter getragen werden kann. Die Flugweite hängt dabei jeweils von der Masse und der Morphologie des transportierten brennbaren Materials ab. So können trockenes Papier oder Holzfeinteile weite Strecken zurücklegen. Bei ausgedehnten Wald-Vollbränden (siehe Punkt 4.1.4) werden in der Literatur Transportwege von brennbaren Teilen auch über einen Kilometer berichtet.

Trifft der Wind, insbesondere der böige, auf eine technische Anlage, dann entsteht bei flächigem Angriff ein häufig intermittierender Staudruck, der bei statisch unterdimensionierten Anlagen zum Einsturz führt, was in der Regel auch den Untergang der technischen Einrichtungen zur Folge hat.

Überstreicht der Wind ein größeres Hindernis (z. B. Gebäude), so ist zu beachten, dass auf der windzugewandten Seite (Luv) ein Überdruck (Staudruck) und auf der windabgewandten Seite (Lee) ein Unterdruck herrscht (Bernoulli-Effekt). Für die Branddynamik im Gebäude kann dieser Einfluss eine beachtliche Rolle spielen. Auch die Standfestigkeit von statisch problematischen Bauwerken (z. B. geschwächte Holzbauwerke) ist daher gefährdet, so dass weitere sekundäre Gefahren durch Einsturz herbeigeführt werden können, indem Gas- und Stromanlagen oder andere technische Geräte zerstört oder beschädigt werden.

Der **Luftdruck** ist ohne weitere Bedeutung, wenn von großen Druckunterschieden der Großwetterlage abgesehen wird, durch die Winde und Stürme und letztlich Gewitter entstehen. Die bei Gewitter auftretenden Gefahren durch Blitze werden im folgenden Kapitel 4.1.3 näher beschrieben.

4.1.3 Blitzschlag

Mit über 1,5 Millionen Blitzen pro Jahr in Deutschland kann das Naturereignis praktisch Jedermann treffen. Das Ereignis verläuft flächenbezogen relativ selten, aber mit Folgen, die sehr schadensträchtig sein können. Es lohnt sich daher, sich mit dem Phänomen des Blitzes auseinanderzusetzen und die Nachweisproblematik zu diskutieren.

Der Blitz ist die sichtbare Erscheinung einer elektrostatischen Entladung (siehe Punkt 4.3.5) zwischen Wolken oder zwischen Wolken und Erde, wenn diese gegensätzlich geladen sind. Die Entladung erfolgt dabei in einem Gleichstrom-Lichtbogen (siehe Punkt 4.3.6.2.3: 1.). Erfolgt der Ausgleich zwischen den Wolken, so wird dieser Wolke-Wolke-Blitz oder verkürzt Wolkenblitz bezeichnet.

Der Ladungsausgleich zwischen Wolke und Erde kann als Wolke-Erde-Blitz aber auch als Erde-Wolke-Blitz erfolgen. Beim Wolke-Erde-Blitz schiebt sich aus der Gewitterwolke in einem engen Kanal eine elektrische Ladung ruckweise zur Erde vor; dieser Leitblitz bewirkt eine Erhöhung der elektrischen Feldstärke auf der Erde. Wird die Durchschlagfestigkeit der Luft überschritten, wachsen von der Erde aus Fangentladungen dem Leitblitz entgegen. Treffen Leitblitz und Fangentladung aufeinander, so erfolgt eine schlagartige Entladung in wenigen Millisekunden. In dem durchgehenden Blitzkanal erfolgt also die Hauptentladung, die man als den Blitzschlag erkennt. Das helle Leuchten entsteht in dem im Kanal erzeugten Plasma, das aus weitgehend ionisierter Luft besteht und durchaus Temperaturen von 30.000 °C erreichen kann. Es können in relativ kurzer Zeit weitere Teilblitzentladungen erfolgen. Deshalb sieht man Verästelungen der Blitzwege in Richtung Erde.

Bei dem Erde-Wolke-Blitz geht von exponierten Stellen der Erde ein Leitblitz zur Wolke, so dass von der Erde ein Blitzstrom zur Gewitterwolke fließt. Dieser Blitz ist an den zur Wolke gerichteten Verästelungen zu erkennen. Seine Eigenschaften entsprechen denen des Wolke-Erde-Blitzes.

Ein Blitzschlag kann eine sehr effektive Zündquelle darstellen und gehört zu den häufigsten Brandursachen. Dem steht der so genannte „kalte“ Blitz gegenüber, welcher zwar mechanisch oder elektrisch zerstörend, aber nicht brandzündend wirkt. In beiden Fällen liegt das gleiche physikalische Phänomen vor, weshalb es tatsächlich keinen „kalten“ Blitz gibt, sondern nur unterschiedliche Wirkungen. Im Fall des fehlenden Zünderfolgs wird der Blitzschlag umgangssprachlich als „kalt“ bezeichnet. Kalten, also nicht zündenden Blitzen ist eigen, dass kaum thermische Spuren vorliegen, aber Sprengwirkungen feststellbar sind. Diese sind in der Regel auf das schlagartige Verdampfen von Wasser in Bäumen, in Konstruktionshölzern oder im Mauerwerk zurückzuführen.

Jeder Blitz stellt eine atmosphärische Entladung von erheblichen Anhäufungen von Ladungen dar, die als Ladungswolken bezeichnet werden. Die notwendigerweise vorangehende Ladungstrennung erfolgt durch heftige Auf- oder Abwinde der feuchten Luft und der Eiskristalle, wobei in den über den Wolken entstehenden Gewitterzellen Gleichspannungen von mehreren Hunderttausend Volt (bis zu 100 Megavolt) entstehen können. Bei einer Feldstärke von 100 kV m^{-1} erfolgt eine Blitzfunkenentladung. Bei Spannungsunterschieden von einigen 10 Megavolt ist ein Erdblitz, also ein Ladungsausgleich zu erwarten.

Der so genannte Vorblitz oder Leitblitz leitet die eigentliche Hauptentladung ein. Ein direkter Durchschlag, wie er vereinfacht unterstellt wird, tritt aber nicht ein, da die Spannungen über die weite Distanz nicht zu Feldstärken über der Durchbruchfeldstärke der Luft führen, auch nicht bei hohen relativen Luftfeuchten.

Es können mehrere Hauptentladungen hintereinander erfolgen, was das Flackern des Blitzes begründet. Die Blitzlänge beträgt bis zu einigen Kilometern und kann, wie den Blitzaufnahmen deutlich zu entnehmen ist, auch schräg und vielfach verästelt erfolgen. Positive Blitze entstehen, wenn die Wolken positiv geladen sind. Sie sind stromstärker als negative Blitze.

Der Ladungsausgleich erfolgt innerhalb weniger Millisekunden. Der Vorblitz dauert meist nur Mikrosekunden, während der Hauptblitz mehrere Millisekunden bestehen bleibt. Der Entladungsstrom im dünnen Entladungskanal ist sehr hoch und erreicht mehrere Zehntausend Ampere (bis 100.000 A). Die Ladungsdichte ist daher extrem hoch. Im Ladungskanal herrschen deshalb kurzzeitig extreme Temperaturen (bis 30.000 °C), so dass ein Plasma vorliegt und erhebliche Drücke entstehen. Der Druckausgleich erfolgt spontan in der näheren Umgebung und wird als Donner wahrgenommen, welcher sich mit Schallgeschwindigkeit ausbreitet (ca. 300 m/Sekunde). Zur Abschätzung der Entfernung einer Gewitterzone kann die Laufzeit des Donners benutzt werden, weil die Zeitdifferenz zwischen Lichterscheinung und ankommendem Donner je Sekunde einer Entfernung von etwa 300 Meter entspricht. Eine Zeitverzögerung von 3 Sekunden bedeutet somit eine Entfernung des Blitzeinschlags von etwa einem Kilometer.

Der Blitz wird durch Stromwerte i charakterisiert. Der Maximalwert des Blitzstroms bestimmt den Spannungsabfall am Erdungswiderstand des vom Blitz getroffenen Objektes. Dieser bestimmt somit die Spannungsanhebung gegenüber der neutralen Erde. Der Energieumsatz wird durch die im Blitz gespeicherte Ladung bestimmt und wirkt am Einschlagort. Die Ladung Q ergibt sich aus dem Blitzstrom und der Zeitdauer der Einwirkung nach

$$Q = \int i \, dt$$

Zusätzlich wird der Blitz durch den Stromquadratimpuls beschrieben:

$$Q' = \int i^2 \, dt$$

Q' besitzt die Dimension $A^2 s$, die sich umrechnen lässt in $J \Omega^{-1}$; es handelt sich also um eine spezifische Energie, welche für die Erwärmung und die dynamische Beanspruchung von blitzstromdurchflossenen und widerstandsbehafteten elektrischen Leitern maßgeblich ist. Eine weitere Kenngröße ist die Blitzstromsteilheit von der Dimension Strom pro Zeit (di/dt). Dieser Wert ist maßgeblich für die Höhe der induzierten Spannungen in den Installationsschleifen, die sich in der Nähe von blitzstromdurchflossenen Leitern befinden. Typische maximale Werte für diese Größen sind

Scheitelwert	200	kA
Gesamtladung	300	C
spezifische Energie	10.000	$\text{kJ } \Omega^{-1}$
mittlere Stromsteilheit	200	$\text{kA } \mu\text{s}^{-1}$

Bei solchen Daten ist nicht überraschend, dass die Folgeschäden eines Blitzschlags immens sein können, was letztlich zu den Anstrengungen bezüglich des äußeren und inneren Blitzschutzes geführt hat. Als Folgeschäden seien hier beispielsweise genannt:

- Tod oder Verletzungen von Personen
- Brände
- Zerstörung von Leitungen, Geräten, Datenverarbeitungsanlagen
- Beschädigungen von Gebäuden und Installationen
- Zerstörung von Kommunikationsanlagen (TV, Telefax, Telefon)
- Störung und Zerstörung von MSR-Einrichtungen
- Fehlalarme, Störung von Gefahrenmeldeanlagen (BMA, EMA, ÜMA)
- Fehlauslösungen von technischen Einrichtungen
- Störung brandschutztechnischer Einrichtungen
- Störung der Sicherheitstechnik (Löschanlage, Gaswarnanlage, RWA, ELA, GLT, Zugangskontrollen)
- Störung von Betriebsabläufen
- Auslösung von Überstromschutzeinrichtungen
- Datenverlust

Diese Folgeschäden sind bei der Analyse eines vermuteten Blitzeinschlages zu beachten und können auch als indirekter Nachweis eines Blitzschlages dienen.

Der Wirkungs- bzw. Einschlagort eines Blitzes hängt von der lokal vorherrschenden Feldstärke ab. Deshalb sind hoch aufragende Bauten (Kirchtürme, Masten, vereinzelte Bäume) bevorzugte Wirkungsorte. Bauliche Anlagen, bei denen nach Lage, Bauart oder Nutzung ein Blitzschlag leicht eintreten kann oder ein Blitzschlag zu schweren Folgen führt, sind nach der Musterbauordnung mit dauernd wirksamen Blitzschutzanlagen zu versehen. Durch Blitzschutzanlagen werden bewusst Feldverzerrungen so erzeugt, dass sich eine bevorzugte Einschlagsstelle ergibt, um die Blitzströme gezielt und sicher auf kurzem Weg zur Erde abzuleiten. Damit soll verhindert werden, dass der Blitz in gefährdete Bereiche eindringt und einen Schaden verursacht. Eine Blitzschutzanlage ist aber auch bei korrekter Ausführung und sorgfältiger Wartung kein Garant, dass der Blitz bahngeführt zur Erde abgeleitet wird. Die Errichtungsbestimmungen geben klare Anweisungen, um primäre wie sekundäre Schäden zu vermeiden sind. Defekte Blitzschutzanlagen können die Gefahr sogar vergrößern.

Die Anforderungen an Blitzschutzanlagen sind in den Normen vom Oktober 2006 und in Beiblättern vom Februar 2007 festgelegt

VDE 0185-305-1 bis VDE 0185-305-4

bzw. auch mit der Bezeichnung

DIN EN 62305-1 bis DIN EN 62305-4.

In diesen Normen und Beiblättern finden sich folgende vertiefende Themen:

- Allgemeine Grundsätze
- Risikomanagement
- Blitzgefährdung in Deutschland
- Berechnung des Schadensrisikos
- Schutz von baulichen Anlagen und Personen
- Information zur Anwendung
- Information für besondere bauliche Anlagen
- Prüfung und Wartung
- Schutz von elektrischen und elektronischen Systemen
- Schutzklasse

Ziel der Normen ist der Schutz gegen physikalische Schäden und vor Verletzungen durch Berührungs- und Schrittspannungen in und in unmittelbarer Nähe baulicher Anlagen durch den so genannten äußeren und inneren Blitzschutz.

Das **äußere** Blitzschutzsystem soll ein Gebäude schützen, indem es folgende Leistungen permanent zu erbringen hat

- einen Blitzschlag in die bauliche Anlage abfangen
- den Blitzstrom sicher zur Erde ableiten und
- den Blitzstrom in der Erdungsanlage verteilen.

Das **innere** Blitzschutzsystem soll gefährliche Funkenbildung innerhalb der baulichen Anlage verhindern

- durch Potentialausgleich oder
- Trennungsabstände zwischen dem äußeren Blitzschutzsystem und den elektrischen Betriebsmitteln innerhalb der baulichen Anlage.

Die gesetzlichen Vorgaben sind in den Ländern unterschiedlich, so dass im Einzelfall die baurechtlichen Vorgaben der Länder zu prüfen sind. Die Hinweise finden sich in den Landesbauordnungen, den Sonderbauverordnungen und -richtlinien oder in den Prüfverordnungen. Die Forderung nach einem umfassenden Blitzschutz erheben die Baubehörden (Baugenehmigung, Landesbauordnung) oder die Gebäudeversicherer nach einer Risikobewertung nach DIN EN 62305-2. Im privaten Wohnungsbau wird diese allerdings nicht gefordert.

Kontrollierte Blitzeinschläge verlangen nach Fangeinrichtungen, bestehend aus Fangstangen und engmaschig verlegte Fangleitungen, die auf gefährdeten Objekten angebracht werden und diese niederohmig mit Erden verbinden. Die Fangeinrichtungen haben also die Aufgabe, den Blitzeinschlagpunkt festzulegen und das Objekt vor direkten Einschlägen an nicht vorhersehbaren Stellen zu schützen. Dabei unterscheidet man nach Blitzschutzklassen, die nach den Normen für das jeweilige zu schützende Objekt unter Berücksichtigung von Risiko, Nutzen und Kosten festgelegt werden müssen.

Tab.: Blitzstromklassen und Blitzstromparameter

1	2	3	4	5	6	7
Schutz-Klasse	Einfangwahrscheinlichkeit	Maschenweite	Ableitungsabstände	max. Strom	spezif. Energie	Blitzkugelradius
	%	m	m	kA	MJ Ω^{-1}	m
I	99	5 x 5	10	200	10	20
II	97 – 98	10 x 10	10	150	5,6	30
III	91 – 97	15 x 15	15	100	2,5	45
IV	84 – 97	20 x 20	20	100	2,5	60

Jede Schutzklasse I – IV besitzt eine Wahrscheinlichkeit, welcher Teil der Blitzeinschläge durch die Blitzschutzanlage beherrscht wird. Dem zugeordnet sind die erforderlichen Maschenweiten der Blitzschutzanlage; je enger die Maschen der Fanganlage sind, desto besser ist der Schutz.

Die Spalten 5 bis 6 beschreiben die Blitzstromparameter, denen die vier Blitzstromklassen in der 1. Spalte zugeordnet sind. Die Blitzschutzklasse I bietet daher den höchsten Schutzgrad, während die Schutzklasse IV den niedrigsten aufweist. Je höher und damit gefährlicher die Blitzstromparameter sind, desto enger muss die Maschenweite der Fangleitungen gewählt werden, wie in der 3. Spalte angegeben ist; ebenso ist der Abstand der in der Regel vertikalen Ableitungen zur Erde konsequent zu reduzieren.

Die Blitzschutzklasse hängt von mehreren Parametern ab, die bei der Gefahrenanalyse zu berücksichtigen sind:

- örtliche Lage
- Bauart
- Nutzung
- Folgen
- Folgen eines Ausfalls
- Zerstörung
- Umweltschaden

Zur Schutzklasse I gehören beispielsweise:

- Ex-Bereiche
- bauliche Anlagen der chemischen und petrochemischen Industrie
- explosionsgefährdete Läger, Silos und Bereiche
- Flughafen-Tower
- Rechenzentren

Zur Gefahrenklasse II zählen beispielsweise:

- Anlagen für brennbare Gase und Flüssigkeiten
- Anlagen zur Be-/Verarbeitung und Lagerung brennbarer Stoffe
- Einsatzzentralen der Feuerwehr und der Polizei
- Gewerbe und Industrie mit erhöhter Brandgefahr
- Hochhäuser über 100 m
- Krankenhäuser
- Fernmeldetürme
- weiche Bedachungen

Zur Gefahrenklasse III gehören zum Beispiel:

- Archive
- Bäder
- Bahnhöfe
- Heu- und Strohlager
- Bauliche Anlagen in exponierter Lage, zugänglich für Personen
- bauliche Anlagen mit MSR-Einrichtungen
- Hotels > 60 Betten
- Bürogebäude > 2000 m²
- Kulturgüter
- Kindergärten
- Kirchtürme
- Schornsteine
- Schulen
- Mehrfamilienhäuser ab 20 Wohnungen

In der letzten Spalte 7 der obigen Tabelle ist der so genannte Blitzkugelradius angegeben, dessen Festlegung von folgender Überlegung ausgeht. Ein Leitblitz nähert sich einem Objekt auf der Erde unter beliebigen Winkeln. Sobald ihn von einem Objekt nur noch die Enddurchschlagsstrecke h_B trennt, wird die Fangentladung von diesem Objekt ausgelöst und damit der Einschlagort festgelegt. Diese Enddurchschlagsstrecke h_B wird durch eine „Blitzkugel“ mit dem Radius h_B nachgebildet, deren Oberfläche eine Äquipotentialfläche darstellt. Aus umfangreichen Versuchen und Auswertungen ist bekannt, dass der Einschlagpunkt erst auf den letzten 30 bis 50 Metern festgelegt wird. Aus dieser Erkenntnis entstand das Modell der Blitzkugel. Der Leitkopfb Blitz soll sich dabei in der Mitte dieser gedachten Kugel befinden.

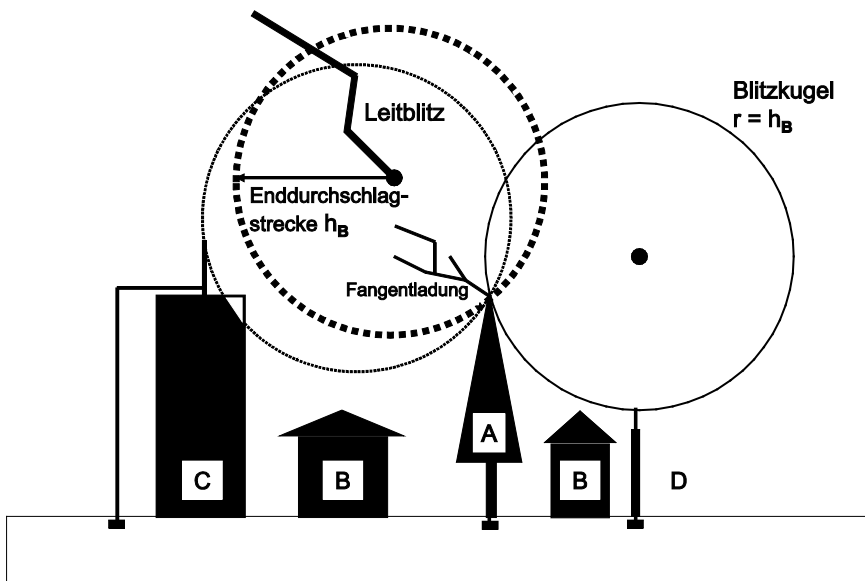


Abb. 6: Blitzkugelverfahren (Blitzschutz für Gebäude B, Teilschutz für Gebäude C; Schutzerdung bei C, A, D)

Diese virtuelle Kugel wird in allen Richtungen um und über das zu schützende Objekt gerollt. Berührt die Kugel eine bauliche Anlage, also auch Aufbauten wie Lüfter, Aufzugschächte und Klimaanlage, dann ist auch dort eine Fangeinrichtung zu installieren. Nur die in der Abbildung 6 in die Blitzkugel hineinragenden oder auch die Blitzkugel berührenden Gebäude und Anlagen sind blitzgefährdet (Abb. 6: C). Das Blitzkugelverfahren ist sehr praktisch für die Konzeption und Begutachtung von Blitzschutzanlagen, insbesondere bei komplizierten Gebäudestrukturen, aber dennoch sehr einfach anzuwenden.

Alternative Verfahren sind das Schutzwinkelverfahren und das Maschenverfahren. Erstes wird bei einfachen Gebäudestrukturen verwendet. Die Schutzwinkel hängen von der Schutzklasse und der Höhe der Fangeinrichtung über dem zu schützenden Bereich ab. Das Maschenverfahren wird bei ebenen Flächen angewendet, wobei die Maschenweite

von der Schutzklasse abhängt. Auf die einschlägige Fachliteratur muss hier verwiesen werden.

Für die im Inneren von Gebäuden verlegten leitfähigen Teile muss ein Sicherheitsabstand zu den Fangeinrichtungen eingehalten werden. Man kann einen Sicherheitsabstand s berechnen, wobei der Abstand der innen zu schützenden Teile größer sein muss als dieser Wert. Auf die einschlägige Fachliteratur, insbesondere auf die Normen hierzu muss verwiesen werden, in denen die Berechnungsgrößen und -methoden beschrieben sind (Schutzklasseparameter, Geometriefaktor, Materialparameter, Abstand zum Potentialausgleich).

Im Blitzkanal (Plasma) erfolgt ein radialer Druckabbau, der zur Umgebung einen solchen Gradienten aufweist, dass mechanische Schäden nur im Nahfeld zu erwarten sind, aber Personen durchaus zu Fall gebracht werden können. Solche Situationen sind insbesondere im Gebirge gefährlich, da hier Druck- und Blitzstromeffekte gleichzeitig auftreten.

Der Blitz hinterlässt auch charakteristische Spuren, die aber nicht zwingend entstehen müssen. Schmelz- oder Verdampfungsspuren und Anlauffarben an Metallen sind ein untrügliches Zeichen der hohen Stromdichte. Sie können bevorzugt an Kanten, Übergangsstellen und Spitzen auftreten. Die Spur muss nicht durchgehend und geschlossen sein, es können auch Schmelzinseln entstehen und der Blitz kann auch größere Entfernungen in der Luft überbrücken, um sich einen neuen Entladungsweg zu suchen. Der Gesamtweg kann also äußerst kompliziert sein. An nicht leitfähigen Materialien werden auch Rauchgasniederschläge beobachtet. Es ist schwierig, den Weg des Blitzes zu rekonstruieren, was aber bei sorgfältiger Spurenanalyse der Schmelzungen, der Anlauffarben und der Rauchgasniederschläge durchaus möglich ist.

Auch Wanddosen und deren Deckel können beschädigt oder weggeschleudert werden. Gerade an widerstandsbehafteten Verbindungsstellen treten Überhitzungen oder sekundäre Lichtbögen auf, die Schmelzschäden verursachen. Thermische Schäden durch Übererwärmung von Leitungsadern können auch zu Spätschäden führen, wobei die Kausalkette bis zur früheren Blitzstromeinwirkung nur selten hergestellt werden kann.

Durch den Blitzstrom oder dessen Teilströme können auch elektrische Leitungen und natürlich deren Isolierung beschädigt oder verdampft werden. Gleiches gilt für alle elektrischen Betriebsmittel und Verbraucher, deren Innenleben, z. B. Platinen, deutliche Spuren aufweisen können. In all diesen Fällen ist eine sorgfältige Untersuchung notwendig, weil die blitztypischen Spuren auch in Kleinstflächen zu finden sind. In besonders bedeutsamen Anlagen, wie Rechenzentren oder auch isolierte PC, sind Schäden zu erwarten, die sich nicht in einem eindeutigen Spurenbild niederschlagen.

Im Erdreich werden im Bereich des Blitzkanals wegen der hohen Temperatur Sinterungs- und Verglasungseffekte beobachtet, die man als Fulgurite bezeichnet. Sie treten nur bei bestimmten geologischen Materialien auf und werden daher selten nachgewiesen. Gelegentlich können Schmelzspuren auch an Dacheindeckungen beobachtet werden, aber es können auch nur Absprengungen entstehen.

Manchmal treten durch den Hochstrom auch Magnetisierungseffekte auf. Man kann diese mit der Kompassnadel belegen. Sie sind aber mit großer Vorsicht zu bewerten, da sie nicht zwingend auf die Blitzeinwirkung zurückzuführen sind. Insbesondere kann aus dem Fehlen der Magnetisierung keinesfalls ein Ausschluss abgeleitet werden.

Die hohen Temperaturen des Blitzes würden immer eine extrem hohe Gefahr darstellen, wäre die Einwirkungsdauer nicht so kurz. Es fehlt daher häufig an der Zündenergie. Leicht entflammbares Material ist dagegen gegenüber der Blitzeinwirkung sehr gefährdet. Es überrascht daher nicht, dass bevorzugt landwirtschaftliche Gebäude und Läger mit leichtentzündlichem Inventar nicht nur einschlaggefährdet, sondern auch brandgefährdet sind.

Blitzeinschläge müssen nicht direkt erfolgen, um schädigend zu wirken. Die Versicherungswirtschaft weiß zu berichten, dass insgesamt die weitaus höheren Schadenssummen im Inneren von Gebäuden und entfernt vom eigentlichen Einschlagort entstehen. Diese Schäden werden indirekte Blitzschäden genannt und werden auf blitzbedingte Spannungsüberhöhungen in den elektrischen Versorgungsleitungen zurückgeführt. Diese Schäden treten vielfach spontan mit dem Blitzschlag auf und sind nur teilweise offenkundig. So können auch im Innenbereich Leitungen verdampfen, Dosenabdeckungen und Unterputzinstallationen abgesprengt oder elektrische Geräte bzw. Bauteile beschädigt oder funktionsgestört werden. Bei einer solchen Spurenlage ist bei einer zeitlichen Koinzidenz mit dem Blitzereignis (Lichtblitz, Donner) der Nachweis eines Blitzeinschlages einfach zu führen.

Bei einer unsicheren Kausalkette ist die Befragung mehrerer Personen ratsam, ob in der Umgebung sekundäre Schäden an anderen Betriebsmitteln zum Zeitpunkt des vermuteten oder behaupteten Blitzschlages entstanden sind. So können durchaus Straßenzüge von diversen Überspannungsschäden betroffen sein.

Problematisch sind jene Schäden, die nicht spontan zu einem Ausfall oder zu einer Schädigung eines elektrischen Betriebsmittels führen. Das sind innere Schäden in elektrischen Verbrauchern, die eine latente Gefahr darstellen, die aber erst mit Zeitverzug wirksam werden. So können sicherlich so manche technische Ursachen im Bereich der Elektrik auf eine Vorschädigung durch ein Blitzereignis (oder eine andere Spannungsüberhöhung) zurückgeführt werden (siehe Punkt 4.3.6.2.1: 5.). Der Beweis ist hier sehr schwer zu führen. Die Industrie hat zur Verhinderung solcher Schäden den inneren Blitzschutz entwickelt, der blitzbedingte Spannungsspitzen unschädlich beseitigen soll, indem elektrische Einrichtungen (Überspannungsableiter) die schädigende Spannung schon an der Übergabestelle der Energieversorgung (Bereich Hauptsicherung oder Energiezähler) zur Erde ableitet. Solche Geräte sind Funkenstrecken, Varistoren, gasgefüllte Überspannungsableiter oder Suppressordioden.

Zusätzlich ist ein Blitzschutz-Potentialausgleich für alle von außen in die Gebäude eingeführten leitfähigen Systeme zwingend vorgeschrieben. Die Verbindung aller metallischen Systeme und deren Anschluss an den Blitzstrom-Ableiter muss sorgfältig ausgeführt werden.

Dieser innere Blitzschutz ist gerade in der Digitaltechnik wegen der niedrigen Signalpegel besonders wichtig (Digitalsteuerungen, PCs, Großrechner), um erhebliche Schäden zu vermeiden. Hier müssen große Anstrengungen unternommen werden, um Überspannungen zuverlässig abzuleiten.

Bei einem Blitzeinschlag kann es auch nur zu Verdampfungserscheinungen von Flüssigkeiten kommen, ohne dass der Zünderfolg eintritt (kalter Blitz, siehe Punkt 4.1.2). Von besonderer Bedeutung ist hier das Wasser, das beim Verdampfen ein Vielfaches seines Volumens einnimmt (theoretisch 1.600-fache Volumenvergrößerung). Dies wirkt sich dahingehend aus, dass zum Beispiel feuchte Holzbalken in Faserrichtung völlig auffasern, wobei eine Zündung des Holzes nicht zwingend ist. Entsprechende Verdampfungsschäden werden auch an Hochbauten und Schornsteinen und im Mauerwerk beobachtet.

Trifft ein Blitz einen Menschen direkt, so wird die Wirkung eines Hochstromimpulses eintreten, mit der Folge eines spontanen Todes. Vielfach kommt es zu extremen Verbrennungen am Körper und zur Inbrandsetzung der Kleidung. Schmelzspuren an getragenen leitfähigen Gegenständen (Ketten, Brillen, Pillendosen) sind zu beobachten. Befindet sich der Mensch in der Nähe eines Blitzeinschlages, so kann er im so genannten Spannungstrichter eine lebensgefährliche Schrittspannung abgreifen. Blitzschutz kann daher nie unter exponierten Stellen gefunden werden (z. B. unter frei stehende Bäumen), weil gerade dort eine erhöhte Gefahr des direkten Blitzschlages und die Gefahr der Überbrückung einer bedrohlichen Schrittspannung sehr hoch ist. Wegen der im Spannungstrichter mit den Füßen abgreifbaren Spannung sollten diese bei Gewitterlagen in geschlossener Stellung verbracht werden, wobei eine geduckte Haltung selbstsichernd wirkt.

Wird während eines Gewitters eine Brandzündung durch Blitzschlag behauptet, so ist das Eliminationsverfahren streng anzuwenden. Es muss nach Spuren des Blitzes gesucht werden, wobei diese Spuren aber nicht zwingend sind. Überspannungsschäden außerhalb des vermuteten Blitzeinschlagortes können als wichtiger Hinweis für einen Blitzeinschlag betrachtet werden. Letztlich kann auch das von der Industrie entwickelte Blitz-Ortungsverfahren (z. B. BLIDS, ALDIS, EUCLID) eingesetzt werden, das mittlerweile eine örtliche Auflösung des Blitzeinschlages von einigen Hundert Metern erlaubt. Mit Hilfe der genauen geographischen Daten des Brandobjektes (Katasterplan, Vermessungsämter, GPS-Daten) können die Blitzeinschläge innerhalb des interessierenden Zeitfensters zusammen mit deren elektrischen Kenngrößen abgerufen werden. Da das Ortungsverfahren aber aus technischen Gründen nicht alle Blitze registrieren kann, muss mit diesen Aussagen sehr verantwortungsvoll umgegangen werden. So kann man wohl einen Blitzschlag bestätigen, aber kaum zuverlässig ausschließen. Die Ortungseffizienz wird mit 95 % bis 99 % angegeben.

Neben dem Ortungsverfahren sind die objektiven und subjektiven Beweismittel zu nutzen, insbesondere bei einem Verdacht der vorsätzlichen Inbrandsetzung zur Gewitterzeit und dem insistierenden Hinweis auf den angeblichen direkten Blitzeinschlag. Die Anwendung des Eliminationsverfahrens ist zwingend erforderlich.

Die Blitzhäufigkeit ist geographisch sehr unterschiedlich. In Deutschland liegt die Blitzdichte bei etwa $0,5 \text{ km}^{-2} \text{ a}^{-1}$ bis $10 \text{ km}^{-2} \text{ a}^{-1}$ (im Mittel $4 \text{ km}^{-2} \text{ a}^{-1}$); in Bayern rechnet man im Mittel mit einer Blitzdichte von $1 \text{ km}^{-2} \text{ a}^{-1}$, in Österreich von $1 \text{ km}^{-2} \text{ a}^{-1}$ bis $2 \text{ km}^{-2} \text{ a}^{-1}$ und in Slowenien bis $3 \text{ km}^{-2} \text{ a}^{-1}$. Der Monat Juli ist in Deutschland der gewitteraktivste Monat.

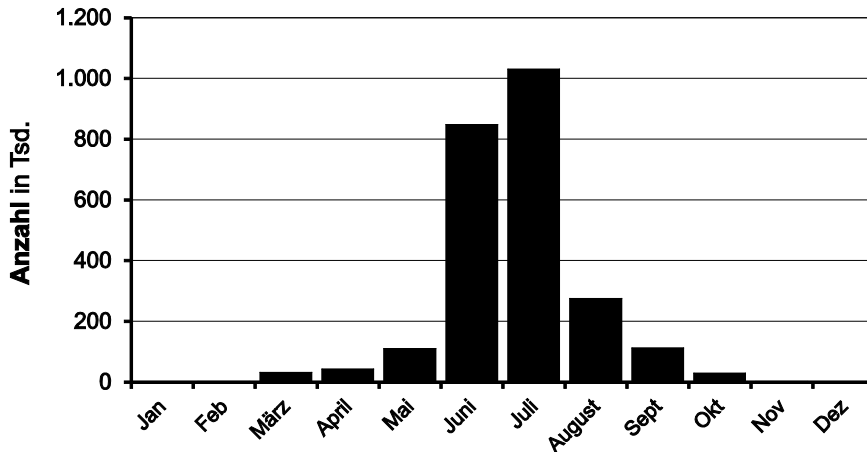


Abb. 7: monatliche Verteilung der Zahl der Blitze in Deutschland in 2006

Der Mensch kann sich vor Blitzeinschlägen schützen, in dem er sich in einem so genannten Faradayschen Käfig aufhält, in dem die Feldstärke Null ist. Dieser Faradaysche Käfig ist in speziellen Blitzschutzzelten realisiert. Der Aufenthalt in Wohnungen gilt ebenfalls als relativ sicher. Auch Fahrzeuge mit metallischer Karosserie gelten als sicher, wobei durch Kunststoffkarosserien der Schutz stark vermindert wird, wenn nicht sogar aufgehoben ist.

Die Existenz von so genannten Kugelblitzen wird gelegentlich beschrieben. Es gibt auch Photos von solchen Lichterscheinungen. Sie sollen etwa bis fußballgroß sein, Wände durchdringen und in leitfähigen Gegenständen verschwinden können. Die Existenz ist wissenschaftlich strittig. Verschiedene Institutionen beschäftigen sich mit der Physik des Kugelblitzes. Es gibt aber (noch) keine physikalische Erklärung. Manche Erklärungen stellen auf einen physiologischen Netzhauteffekt ab, der durch die extreme Helligkeit hervorgerufen werden soll.

Das Wetterleuchten entsteht durch den Widerschein von Blitzen aus weit entfernten Gewitterzonen. Wegen der Dispersion und der Absorption des Schalles kann der im Gewitterbereich entstehende Donner an entfernten Orten nicht gehört werden. Eine Gefahr geht vom Wetterleuchten nicht aus, es kündigt allenfalls ein Gewitterereignis an.

4.1.4 Wald- und Graslandbrand

Der schon im Abschnitt 4.1.1 angesprochene Waldbrand ist ein Naturereignis von besonderer Öffentlichkeitswirkung. Selbstverständlich stellt er keine eigene Brandursache dar, sondern ist das Ergebnis der Einwirkung verschiedenster Zündquellen, wie z. B. fokussierte Sonnenstrahlung, Blitzschlag, technische Einrichtungen oder menschliches Fehlverhalten.

Wegen der besonderen Erscheinungsformen der Naturbrände soll hier eine von der Systematik der Brandursachen zwangsläufig abweichende Ergänzung vorgenommen werden, um die besondere Dynamik dieser Naturbrände zu vermitteln, welche für die Brandursachenforschung wichtig sein kann. Der Naturbrand hängt dabei nicht nur von der Sonneneinstrahlung (siehe Punkt 4.1.1) ab, sondern gerade auch von den klimatischen Bedingungen (siehe Punkt. 4.1.2).

In Wäldern oder im Grasland liegen Feststoffe pflanzlichen Ursprungs vor, die überwiegend aus Zellulose bestehen. Die Naturbrände werden von vielen Einflussgrößen bestimmt, insbesondere vom Feuchtigkeitsgehalt, dem Harzgehalt, von der Größe und der Form des brennbaren Materials. Nadelholzbestände sind gefährdeter als solche aus Laubhölzern. Trockene, abgestorbene Vegetation ist besonders leicht zu entzünden. Dabei spielen die Vegetationsperioden eine große Rolle.

Von besonderer Bedeutung ist bei Naturbränden der freie Zustrom von Verbrennungsluft in die Brandzone, was bei Raumbränden in der Regel nicht der Fall ist. Es können im Fall der Zündung von Naturbränden verschiedene Feuer unterschieden werden:

- a) Erdfeuer
- b) Bodenfeuer, Lauffeuer
- c) Stammfeuer
- d) Wipfel-, Kronen- und Vollfeuer
- e) Flugfeuer

a)

Erdfeuer findet man überwiegend in Moor- und Torfgebieten. Es handelt sich meist um schwach rauchende Glimmbrände in trockener Substanz unterhalb der Bodendecke. Sie reichen bis zu einige Meter in die Tiefe. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit ist sehr niedrig, typisch bis zu wenige Meter pro Tag. Sie können in Bodenfeuer übergehen. Das Löschen von Erdfeuern gestaltet sich sehr schwierig und ist gefährlich.

b)

Bodenfeuer, auch Lauffeuer genannt, ist die häufigste Erscheinung des Wald- und Graslandbrandes und kann durch Fokussierung des Sonnenlichts, aber meistens durch glimmende Tabakreste, Funken, Grillfeuer oder Verbrennungsmotoren ausgelöst werden. In der Bodenvegetation findet der Brand je nach Jahreszeit günstige Nahrung. Es ist nahe liegend, dass vor allem der Wind und ansteigendes Gelände die Ausbreitung begünstigen (elliptisch geformte Abbrandfläche). Es entsteht ein deutlicher Feuersaum,

wobei Nachbrennen querschnittstärkeren Materials das Bodenfeuer auch als Flächenbrand erscheinen lässt. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit ist sehr unterschiedlich, in der Regel unter 500 m h^{-1} , kann aber in ungünstigen Fällen bis 2000 m h^{-1} erreichen. Die Löscharbeiten sind bei niedrigen Ausbreitungsgeschwindigkeiten effektiv durchzuführen.

c)

Stammfeuer ist sehr selten und auf Einzelstämme beschränkt. Der Abbrand erfolgt meist im Inneren hohler Bäume und ist deshalb leicht zu löschen. Es besteht aber die Gefahr des Übergriffs auf die Vegetation, so dass sich ein Bodenfeuer anschließen kann.

d)

Kronen- und Vollfeuer entstehen aus Bodenfeuer. Sie entwickeln extreme Hitze, besitzen eine eigene Thermik und sind daher am schwierigsten zu löschen, wie die Waldbrandkatastrophen verdeutlichen. Sie entwickeln sich schneller als Bodenfeuer. Problematisch ist, dass infolge des thermischen Auftriebs ein effektiveres Kronenfeuer entstehen kann, das dem Bodenfeuer vorauszieht und in größerer Entfernung zum Entstehungsort sekundäre Bodenfeuer zünden kann; diese können fälschlich als unabhängige Brandstellen gedeutet werden. Auch können auf diese Weise Schneisen und Wege übersprungen werden. In extremen Fällen wurden Ausbreitungsgeschwindigkeiten bis zu 7 km/h festgestellt. Ansonsten erfolgt die Ausbreitung wie beim Bodenfeuer.

e)

Flugfeuer entstehen aus Kronen- und Vollfeuer, wenn starker Wind herrscht, sich extreme Hitze entwickelt und dadurch brennende und glühende Teile in der Luft transportiert werden. Wegen der extremen Brandausbreitung und der erhöhten Ausbreitungsgeschwindigkeit laufen Einzelbrände zusammen, weil große Distanzen übersprungen werden können. Bei Vollfeuer können dabei Entfernungen bis zu 400 Meter übersprungen werden. Ausbreitungsgeschwindigkeiten sind so unterschiedlich, dass kein typischer Wert angegeben werden kann.

In allen Fällen, wo extreme Ausbreitungsgeschwindigkeiten vorliegen oder brandfreie Zonen übersprungen werden, besteht grundsätzlich die Gefahr des Einschlusses von Löschkraften und Helfern und auch von Gebäuden.

Bei Vollbränden kann ein Konvektionssog, ein so genannter Feuersturm, entstehen, wenn ein großvolumiges Feuer Umgebungsluft ansaugt. Dies kann so heftig erfolgen, dass sich Zyklone bilden und gefährliche Unterdrücke in der Umgebung sich entwickeln. Dabei ist auch der Transport von brennbaren Teilen über weite Entfernungen möglich. Ein besonders schreckliches Beispiel eines Feuersturms, allerdings in städtischer Bebauung, ist durch den Brand in Dresden im Februar 1945 bekannt geworden.

Wie schon erwähnt, ist die Gefahr des Wald- und Grasflächenbrandes stark vom Klima und der Witterung abhängig. Die Waldbrandgefahr nimmt deshalb zu mit

- Niederschlagsmangel
- geringer Bodenfeuchtigkeit (< 15 %)
- geringer relativer Luftfeuchtigkeit (< 50 %)
- lang anhaltender hoher Lufttemperatur
- Sonnenscheindauer
- trockenem Wind (insbesondere bei Windstärke 2 Bft bis 5 Bft)

Die Vormittagszeit ist von der Aufbereitung des brennbaren Materials geprägt, so dass später die Zündung eines Waldbrandes begünstigt wird. Die Gefährdung erreicht einen statistischen Höhepunkt zwischen 12:00 Uhr und 16:00 Uhr. In dieser Zeit hat auch die Sonne ihre effektivste Wirkung.

Unter langjähriger Beobachtung zeigt sich wegen der Winterdürre eine besonders hohe Gefahr etwa von Mitte März bis Mai, aber auch während der Sommerdürre im Juni bis August. Im Sommer ist mit einer begünstigten Ausbreitung zu rechnen. Ein Klimawandel wird diese Gefährdungszeiträume möglicherweise vergrößern.

Der Zustand der Bodenvegetation bzw. der Bodendeckung ist maßgeblich für die Entstehung von Bodenfeuern und die Ausbreitungsgeschwindigkeit. Dürres Gras und trockenes Reisig werden heute aus ökonomischen und ökologischen Gründen nicht mehr aus dem Wald entfernt und stellen daher eine besondere Gefährdungslage dar. Günstig wirken auch dürre Farne, Heide und Heidelbeere.

Die Forstämter und die zuständigen Ministerien veröffentlichen regionale Waldbrandwarnstufen. Auch der Waldbrandgefahrenindex M-68 stellt eine derartige Informationsquelle dar. Der Deutsche Wetterdienst, Abteilung Agrarmeteorologie, stellt detaillierte Klimadaten zur Verfügung, um die Einschätzung der realen Gefahr zu erleichtern.

Um den Zündort zu bestimmen, sind einige Besonderheiten zu beachten. Bei homogener Brandlastverteilung wird sich der primäre Brand nach allen Richtungen mit gleicher Geschwindigkeit ausbreiten. Die Abbrandfläche gibt unter Berücksichtigung des Bewuchses und der Windrichtung einen Ansatzpunkt für die Beurteilung des primären Brandbereiches. Unter Einfluss von Wind oder Aufwinden wird die Ausbreitung entsprechend begünstigt. Daraus ergibt sich zunächst das elliptische Schadensbild oder eben das in Richtung Luftführung sich aufweitende Schadenstrichterbild. Bei der Rekonstruktion der Branddynamik ist der Zustand der Vegetation von besonderer Bedeutung und kann die verschiedenen, oben erwähnten Formen des Waldbrandes bestimmen. Außerdem fallen gelegentlich Schadensspuren an Bäumen und am Bewuchs auf, die auf der Seite des ankommenden Feuers deutlicher ausgeprägt sind. Diese Spuren sind auszuwerten, um auf das primäre Brandzentrum zu schließen, denn nur dieses ist für die Ursachenfeststellung von Bedeutung. Wegen der Kompliziertheit der Spuren, insbesondere bei inhomogener Brandlastverteilung und wechselnden Windrichtungen und Geländeneigungen kann auf die Befragung von Zeugen und Verwertung von Luftaufnahmen nicht verzichtet werden.

Die konsequente Anwendung des Eliminationsverfahrens ist wegen der zahlreichen alternativen Ursachen unumgänglich. Solche sind nicht abgelöschte offene Feuer und Glutreste, Tabakglut, Abfall- und Grasverbrennung, Funkenflug, Kurzschlüsse an elektrischen Leitungen, Pyrotechnik, Blitzeinwirkung, Munition, Selbstentzündung, Verbrennungsmotoren und als Besonderheit Hohlbaumbrände aus vorangegangenen Brand („Sleeper“). Außerdem ist fahrlässiges Handeln oder eine Vorsatztat zu prüfen.

Wald- und Graslandbrände sind aber auch oft als Rodungsbrände gewollt, um eine - umstrittene - Bearbeitung von Wäldern und Grasland durchzuführen, die aus den geschilderten Gründen außer Kontrolle geraten kann.

4.1.5 Erdbewegungen

Erbbewegungen sind nicht selten, stellen aber keine unmittelbare Brandursache dar. Sie werden als Gerölllawinen, Murenabgänge, Gebirgsschläge oder Erdbeben wirksam. Damit geht eine große Gefahr für die Sicherheit von Gebäuden, Industrieanlagen und vor allem für deren technische Infrastruktur und für Feuerstätten einher. Auch Versorgungseinrichtungen für Gas und Strom sind gefährdet. Die Erdbewegungen verursachen gravierende Sekundärschäden aus allen noch zu besprechenden technischen Bereichen.

Vulkanausbrüche mit dem Auswurf glühender Lava und erhitzter geologischer Materialien stellen eine extreme Brandgefahr dar, die zum Untergang kompletter Ansiedlungen geführt haben. Diese Gefahren bestehen aber nur in entsprechend geologisch instabilen Regionen.

Erbbewegungen in Zusammenhang mit Tiefbaumaßnahmen (Tiefgaragen, U-Bahn-Bau, Kanalbau, unterirdische Lager) können elektrische Leitungen und Blitzschutzanlagen beschädigen. So können in Erdkabeln Folgeschäden durch Beschädigung der Isolierungen oder Durchtrennung des Neutralleiters herbeigeführt werden. Im ersten Fall treten Kriechströme und im zweiten Fall Spannungsverschiebungen im Drehstromnetz bzw. Spannungsüberhöhungen in zwei Außenleitern (Phasen) des Drehstromnetzes auf. In entfernt gelegenen Gebäuden können dadurch irreversible Schäden an elektrischen Betriebsmitteln oder gar eine Brandzündung herbeigeführt werden. Im Fall von Gasleitungen können Leckagen durch Risse oder Rohrrennungen entstehen, so dass Leckgas auch in abgelegene Gebäude geleitet und entzündet werden kann, und eine Explosion mit einem Folgebrand ausgelöst wird.

Einstürze von Tunnelanlagen, von unterirdischen Gängen und von Bergbaustollen zerstören immer die vorhandene technische Infrastruktur, sei es Strom-, Gas- oder Druckluftleitungen, Absauganlagen und deren Komponenten. Entsprechende Sicherungsmaßnahmen sind zwingend.

4.1.6 Tiere

Tiere begründen keine eigenständige Brandursache. Sie können aber in vielfacher Weise mit einer Brandzündung in Verbindung gebracht werden.

Sie können sich bei unbeaufsichtigter Haltung aber so bewegen, dass andere Gegenstände ihre ursprünglich gesicherte Position verlieren. Typische Inbrandsetzungen erfolgen, wenn Haustiere brennende Kerzen oder kerzenbestückte Christbäume oder Wärmegeräte umstoßen. Das Umstoßen von offenen Behältern mit brennbaren und verdampfbaren Flüssigkeiten kann je nach Entfernung zu einer Zündquelle zu einer mehr oder weniger zeitverzögerten Explosion oder Inbrandsetzung führen. Auch wird das Einschalten von Geräten beobachtet, was bei Tasterschaltungen oder Schaltern mit entsprechender Schalthebel- oder Schaltknebelgestaltung und niedrigem Betätigungswiderstand bzw. -drehmoment unschwer möglich ist.

Gegenstände können durch Tiere auch verschleppt werden. So kann Brennbares in brandgefährliche Bereiche transportiert werden oder brennbares Material zur Verdämmung benutzt werden. So ist auf den Nestbau zu verweisen, der auf selten benutzten Wärmegeräten oder leistungsstarken Leuchten erfolgt. In diesen Fällen ist eine Brandzündung nahe liegend, wobei bei den selten betriebenen Einrichtungen auch eine erhebliche Zeitverzögerung bis zur Brandzündung vorliegen kann. Der Nestbau in Schornsteinen außerhalb der Heizperiode und die Entflammung des Nestes wird zwar berichtet, führt aber ebenso wie das sachgerechte Ausbrennen des Schornsteins nicht zur Brandzündung. Wärmestrahlerleuchten (IR-Strahler) können aus der Verankerung gerissen oder umgestoßen werden und entzünden Einstreumaterial. Tiere können auch Einstreumaterial so anhäufen, dass der vormalig korrekte Schutzabstand zu gefährlichen Wärmequellen unterschritten wird.

Berichte über den Transport von glimmendem Tabak durch Vögel und die Entzündung von Streichhölzern durch Nagetiere sind vorhanden, jedoch von höchster Seltenheit und kaum nachweisbar. Zündhölzer ohne Sicherheitsfunktion könnten durchaus entzündet werden, hingegen Sicherheitsstreichhölzer nicht.

Denkbar ist auch eine Inbrandsetzung durch primär entflammtes langhaariges Fell von Tieren, die sich durch Panikflucht dem Primärflammenbereich entziehen wollen und so das Feuer in brandgefährliche Umgebung transportieren können. Die Gefahr der Fehlbeurteilung nach Feststellung mehrerer Brandstellen ist somit gegeben.

Die größte Gefahr geht sicherlich vom Tierfraß der Nagetiere (Maus, Ratte), Marder und Haustiere aus. Durch Verbiss werden elektrische Isolierungen so geschwächt, dass ideale Voraussetzungen für eskalierende Kriech- und Fehlerströme entstehen (siehe Punkte 4.3.6.2.1: 8. und 4.3.6.2.1). Diese Ströme können einerseits durch Feuchteinwirkung, Staub und Salz begünstigt werden oder das den Verbiss herbeiführende Tier wirkt über längere Zeit selbst als leitfähige Brücke; gelegentlich werden sogar mumifizierte Reste der Tiere aufzufinden sein. Deshalb ist nach Fraß- oder Bisschäden in der Peripherie der Schadensstelle zu suchen; diese Schäden sind an den noch vorhandenen Teilen der Isolierung besonders markant. Aufgestellte Fallen, Giftausbringung, Nagespuren, Futterreste, Nestbau oder Kot dieser Tiere können als Hinweis auf Tieraktivität gewertet werden.

In einem Fall ist sogar die schädigende Einwirkung durch die Larven des Hausbocks (großer Holzwurm, *Hylotrupes bajulus* L.) erwiesen; an einer Holzwand kam es durch die Larve zur Zerstörung der Isolierung einer darauf befestigten elektrischen Leitung und zu

einem Folgelichtbogen und so zur von Zeugen beobachteten Zündung der Holzwand. Die im Nahbereich vorhandenen multiplen Fraßspuren auf der PVC-Isolierung korrespondierten mit den ovalen Fraß-Ausgängen im Holz. Die Fraßspuren waren nach zoologischer Auskunft eindeutig der Larve zuzuordnen. Hier bestätigen objektive Spuren die subjektiven Angaben und belegen die Brandursache.

Neben der Isolierung von elektrischen Leitungen sind auch mechanisch ungeschützte Schläuche zum Flüssigkeits- und Gastransport gefährdet. Bei brennbaren Flüssigkeiten besteht die Gefahr des Austritts, gerade wenn die Flüssigkeit unter Druck steht. Dabei genügen geringste Perforationen, um sogar schwer entzündliche Flüssigkeiten so zu vernebeln, dass sie bei Umgebungstemperatur zündfähig werden (siehe auch Punkt 1.4.6.2 - S. 78). Gasaustritt, der zum Überschreiten der gasspezifischen Zündgrenze (meist UEG) führt, stellt eine erhebliche Explosionsgefahr dar.

Bei elektrischen Anlagen können Nagetiere unschwer in das Innere der Gehäuse oder Abschirmungen eindringen, wenn ein Eindringenschutz (siehe IP-Schutz, Punkt 4.3.6.2.1: 10.) unvollständig ausgeführt ist. Dort abgesetzter Urin kann zu niederohmigen Leitungsbrücken führen, die wegen dessen Leitfähigkeit zu Kriechströmen oder gar zu Lichtbögen führen (siehe Punkt 4.3.6.2.3). Gerade auch in vorgeschädigten Isolierungen reichen geringe Mengen aus, einen kriechstrombegünstigenden Schaden zu initiieren. Dieser Schadensmechanismus ist bei allen urinierenden Tieren zu beachten. Auch in Ställen ist auf diese Weise das entstehende Ammoniak gefährlich, weil sich dieses Gas in Wasser, also auch in kondensierter Feuchtigkeit, löst und eine starke leitfähige Lauge entsteht.

Zu Desinfektionszwecken wird in Ställen auch ungelöschter Kalk (CaO) ausgebracht. Diese Verfahrensweise ist effektiv, aber gleichzeitig brandgefährlich, weil bei zu dichter Ausbringung und Einwirkung von Urin oder Wasser eine gefährliche Erwärmung infolge der chemischen Umsetzung eintritt (siehe Punkt 4.2.1.4). Kalk wurde früher auch in Fehlböden eingestreut und führt bei Eindringen von Wasser ebenfalls zum so genannten Löschen des Kalks unter erheblicher Wärmefreisetzung, die Stäube u. a. sekundär entzündet.

4.1.7 Meteoriten

Meteoriten sind Festkörper aus dem außerirdischen Raum (Asteroidengürtel), die die Atmosphäre der Erde durchquert haben und auf die Erde aufschlagen. Bei der Abbremsung in der Atmosphäre werden sie erhitzt und zeigen deshalb oberflächliche Schmelzerscheinungen, während sie im Inneren wegen der geringen thermischen Leitfähigkeit kalt bleiben. Eine direkte Brandzündung auf der Erde ist ausgeschlossen.

Ihre Auftreffgeschwindigkeit ist hoch, weshalb erhebliche mechanische Schäden entstehen können. Die Meteoriten sind meist von dunkler oder schwarzer Farbe und fallen deshalb im Allgemeinen auf. Die Zahl der weltweit auf die Erde fallenden Meteorite liegt bei etwa 20.000 (m > 100 g); in Deutschland fallen im Mittel etwa jährlich 2 Meteorite von etwa Faustgröße. Nur 46 Meteorite wurden bislang gefunden. Ein außerordentlich wirk-samer Meteoriteneinschlag hat im Übrigen zur Entstehung des nahezu kreisrunden Walls in der Fränkischen Alb (geographisch: Ries) geführt.

Der Einschlag kann also zu erheblichen Zerstörungen führen und damit auch Anlagen beschädigen, die schließlich brandursächlich werden können. Die Häufigkeit solcher Ereignisse ist extrem niedrig; den Autoren ist eine solche Brandursache bislang nicht bekannt, sie wird aber gelegentlich in der Literatur erwähnt.

4.2 Zündung durch chemische Prozesse

4.2.1 chemische Reaktionen

Eine wesentliche Bedingung für die Reaktivität eines Stoffes ergibt sich aus der Art der dem Stoff zugrunde liegenden chemischen Bindung. In welcher Form Bindungen entstehen, wird durch den konkreten atomaren Aufbau der Reaktionspartner bestimmt. Ob eine chemische Reaktion stattfinden kann, hängt von mehreren Faktoren ab. Entscheidend sind das simultane Vorliegen der richtigen Reaktionspartner und der richtigen Reaktionsbedingungen (z. B. Reinheit, Zerteilungsgrad, Druck, Temperatur, Katalysatoren usw.).

4.2.1.1 Begriffe Selbsterwärmung, Selbstentzündung

Nach Meyers Lexikon ist die Selbstentzündung eine Entflammung (Entzündung) eines brennfähigen Stoffes ohne Wärmezufuhr von außen durch spontane chemische Reaktionen oder physikalische Vorgänge, die in oder an der Oberfläche der Brandstoffe die erforderliche Wärmeenergie erzeugen.

Wird die Wärme nicht abgeführt, so verbleibt die Reaktionswärme im Reaktionsprodukt und die Temperatur im Endprodukt nimmt zu. Dieser Prozess wird als Selbsterwärmung bezeichnet, der beim thermischen Einschluss (Verdämmung) brandgefährlich werden kann; beim Erreichen der Zündtemperatur eines brennbaren Materials kann sogar eine Selbstentzündung herbeigeführt werden.

Häufig geht der Selbstentzündung eine längere Anlaufzeit (Induktionszeit) voraus, die bei den zur Selbstentzündung neigenden Stoffen sehr unterschiedlich ist. Dieser Zeitverzug kann im Bereich von Sekunden (pyrophore Stoffe) bis zu Tagen (Nitrorückstände), Wochen (Heu) oder Monaten (Braunkohle) liegen. In der Regel ist keine äußere Wärmezufuhr erforderlich, gelegentlich bedarf es der Zufuhr der Startenergie (Aktivierungsenergie). Bei manchen Reaktionen wirkt sich die Anwesenheit von Katalysatoren reaktionsfördernd aus.

Selbsterwärmung tritt nicht nur bei chemischen Reaktionen auf; nicht unbedeutend sind daneben die biologische und die physikalische Selbsterwärmung, die in den Abschnitten 4.4 und 1.4.2 behandelt werden.

Hinsichtlich der Selbstentzündung von Stoffen gilt grundsätzlich, dass bei höheren Umgebungstemperaturen eine Entzündung dann eintreten wird, wenn die für die konkreten Bedingungen geltende Selbstentzündungstemperatur des Stoffes erreicht wird. Es kommt daher bei einem Zünderfolg stets auf diese Material- und Umgebungsbedingungen an.

Selbstentzündliche Stoffe sind z. B. weißer Phosphor, Gemische aus brennbarem Material und starken Oxidationsmitteln wie Perchlorat.

Glycerin ist leicht zu oxidieren. Wenn Glycerin bei Raumtemperatur auf frisch gemörser-tes Kaliumpermanganat tropft, entzündet es sich innerhalb von Sekunden.

4.2.1.2 Reaktion mit Sauerstoff

Sauerstoff, chemisch O_2 , ist ein farb-, geruchs- und geschmackloses Gas. Es ist selbst nicht brennbar, ermöglicht aber die Verbrennung. Der für die Verbrennung erforderliche Sauerstoff ist in der Luft mit 21 Vol.-% enthalten und praktisch unbegrenzt und ubiquitär vorhanden.

Unter Luftabschluss geglühte und teilweise noch erwärmte Holzkohle wird bei Zutritt von Luftsauerstoff so erhitzt, dass infolge der Adsorption des Sauerstoffes eine Entzündung eintritt. Dieser Vorgang wird bei disperser Holzkohle, insbesondere bei größeren Anhäufungen, verstärkt. Lange Zeit offen gelagerte Kohle verliert an Heizwert, weil die reaktiven Oberflächen mit der Zeit abnehmen. Auch bei Holz kann es zu einer Art Selbstentzündung kommen, auf die später noch genauer einzugehen ist (siehe Punkt 4.4.3).

Weißer Phosphor, in verunreinigter Form auch als gelber Phosphor bekannt, Cäsium, Lithium und Rubidium, Phosphine und Silane entzünden sich bei Raumtemperatur an Luft selbständig. Phosphor wird deshalb unter Wasser gelagert. Metallpulver mit hohem Dispersionsgrad können sich infolge einer Reaktion mit dem Luftsauerstoff selbst so gefährlich erwärmen, dass sie sich entzünden. Metallhaltige Polierabfälle können sehr heiß sein und haben einen so hohen Energieinhalt, dass deshalb die Gefahr von Schwelbränden in den Abfallsilos besteht. Durch entzündungshemmende Additive kann die Selbstentzündungsgefahr von Polierabfällen allerdings reduziert werden.

Eine besondere Stoffgruppe, bei der die Erwärmung oder gar Entzündung an Luft spontan und von selbst eintreten kann, sind die so genannten pyrophoren Stoffe (griechisch: feuertragend).

Dispergierter weißer Phosphor ist schon bei einer Umgebungstemperatur von 34 °C an Luft selbstentzündlich. Ab 50 °C reagieren auch größere Stücke selbstentzündlich. Roter Phosphor, wie er auch für Streichhölzer verwendet wird, entzündet sich dagegen erst bei einer Temperatur von 260 °C und ist daher relativ sicher zu handhaben. Schwefelhaltige Braunkohle, die über 250 °C erwärmt wird, ist brandgefährlich, wobei allerdings die enthaltenen Schwefelverbindungen erheblich beitragen.

Aus historischer Sicht ist die Verwendung von Kohlepulver in flüssiger Luft als Sprengmittel bekannt, das in Bohrlöcher gefüllt wurde. Nachdem der niedriger siedende Stickstoff (Siedepunkt: $-195,80\text{ °C}$) in der flüssigen Luft entwichen ist, reagiert die Kohle mit dem verbleibenden Sauerstoff (Siedepunkt: $-182,97\text{ °C}$), was infolge der Adsorption zur Zündung des Kohlepulvers führt. Der sich dann einstellende Verbrennungsvorgang verläuft explosionsartig, wobei sich infolge der spontan freiwerdenden gasförmigen Verbrennungsprodukte hohe Drücke mit einer großen Sprengkraft entwickeln.

Bei Gasen und verdampften Flüssigkeiten wird bei Erreichen deren substanzspezifischer Selbstentzündungstemperatur (auch AIT oder Zündtemperatur) bzw. bei Kontakt mit einer entsprechend erhitzten Oberfläche eine Entflammung erfolgen (thermische Selbstentzündung). Die maximale Oberflächentemperatur elektrischer Betriebsmittel ist deshalb in so genannten Temperaturklassen T1 (450 °C) bis T6 (85 °C) eingeteilt (siehe Tab. 20), um solche spontanen Entzündungen vermeiden zu können. Bei Schwefelkohlenstoff liegt die Selbstentzündungstemperatur besonders niedrig (102 °C), während sie bei Methan recht hoch liegt (650 °C). Umfangreiche Tabellenwerke stehen für diese Daten zur Verfügung.

Neben der physikalischen Adhäsion und Adsorption (Physisorption genannt), können auch durch Chemisorption (Adhäsion mit höherer Bindungsenthalpie) Selbsterhitzungs- und Selbstentzündungsvorgänge ausgelöst werden. Diese Besonderheit besteht bei der Selbstentzündung von Holz bei längerdauernder Wärmeeinwirkung, wobei pyrophore Holzkohle entsteht. Dies wird im Zusammenhang mit der Problematik der Feuerstätten in Abschnitt 4.3.3, der heißen Oberflächen in Abschnitt 4.3.4 und der Eigenschaft pyrophorer Stoffe in Abschnitt 4.4.3 vertieft behandelt.

Eine besondere Eigenschaft chemischer Stoffe besteht bei Lichteinwirkung in der Ausbildung von Verbindungen mit Luftsauerstoff wie z. B. Peroxide bzw. Hydroperoxide. Dies kann z. B. beim Diethylether (Äther) auftreten, aber auch bei unstabilierten organischen Zwischenprodukten wie Acrylsäure, Acrylnitril und andere. Eisen und Mangan wirken dabei als Katalysatoren. Noch stärker ist die Bildung von Peroxiden bei Anwesenheit von Ozon (O_3) ausgeprägt. Ozon kann unter bestimmten Umständen in erheblichem Maße in der Umgebungsluft enthalten sein (UV-Leuchten, UV-C, Blitzentladung).

Sauerstoff fördert bei Anreicherung über den realen Gehalt der Luft (21 Vol.-%) die Verbrennung immens. Er reagiert mit den meisten Elementen des Periodensystems direkt. Es gibt einige Ausnahmen, insbesondere unter den Nichtmetallen und Edelmetallen. Reaktionen mit Sauerstoff sind fast immer Redox-Reaktionen, bei denen Sauerstoff in der Regel zwei Elektronen aufnimmt und so reduziert wird. Das Element zählt somit zu den Oxidationsmitteln. Häufig verlaufen diese Reaktionen bedingt durch die große freiwerdende Bindungs- oder Gitterenergie unter starker Wärmeabgabe. Es gibt auch explosionsartig verlaufende Reaktionen, wie die Knallgasreaktion oder Staubexplosionen von fein verteilten Stoffen in sauerstoffangereicherter Luft oder reinem Sauerstoff.

In der Glasindustrie sowie beim Schweißen und Schneiden von Beton dient der Sauerstoff zum Erreichen von notwendigen hohen Verarbeitungstemperaturen (Sauerstofflanze, Thermolanze).

Stoffe, die Sauerstoff abgeben, können im Mischungskontakt mit Brennbarem Selbst-erhitzungen begünstigen, so dass das brennbare Material entzündet wird. Insbesondere neigen Peroxide zum Zerfall, bei dem viel Wärme freigesetzt wird. Kommen Peroxide in Kontakt mit organischen Stoffen, kann es zur Selbstentzündung führen. Generell neigen viele Stoffe, insbesondere Kohlenwasserstoffe, in Gegenwart von reinem Sauerstoff zur Selbstentzündung.

Der technisch reine Sauerstoff (98 Vol.-%) kann auch brandauslösend wirken, wie zum Beispiel bei Kontakt mit brennbaren organischen Stoffen wie Fette oder Öle. So dürfen Armaturen von Sauerstoff-Druckflaschen nicht gefettet sein und keine brennbaren Dichtungen aufweisen. Bei unkontrolliertem Austritt von Sauerstoff und Anreicherung in Kleidung wird das textile Material hochentzündlich und kann schon bei einer geringfügigen statischen Entladung explosionsartig abbrennen. Im Brandfall ist auf Sauerstoff-Druckflaschen besonders zu achten, da sie in der Brandhitze undicht werden und sogar berstgefährdet sind. Die Feuerwehren sind vorsorglich auf das Vorhandensein von Sauerstoff-Druckflaschen aufmerksam zu machen.

Sauerstoff wird in Druckgasflaschen transportiert. Der Inhalt ergibt sich aus der Druckmessung, multipliziert mit dem Flaschenvolumen. Im Gegensatz zu Flüssiggas kann die Inhaltsbestimmung nicht durch Wägung erfolgen.

Brennbare Stoffmischungen, in denen ein Stoff große Mengen an chemisch gebundenem Sauerstoff enthält, können selbstentzündlich reagieren. So können z. B. bei der Waschmittelherstellung Selbsterwärmungen auftreten, wenn als Bestandteil der Pulverkomponenten die stark Sauerstoff enthaltende Verbindung Natriumperboratmonohydrat eingesetzt wird. Ab einer gewissen kritischen Menge an adsorbiertem nichtionischen Tensid wird der Zündbereich des Gemisches so weit herabgesetzt, dass es unter ungünstigen Bedingungen zur Selbstentzündung der Gemische bereits bei Raumtemperatur kommen kann. Gelegentlich kann infolge der hohen Reaktionstemperatur auch benachbartes Material durch die Reaktionswärme entzündet werden.

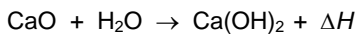
Hochkonzentrierte Salpetersäure (z. B. rauchende Salpetersäure 99 %-ig) ist ein starkes Oxidationsmittel, welches in Verbindung mit vielen organischen Stoffen heftig reagiert und zu Explosionen wie auch zur Selbstentzündung führt. So sollte verschüttete Säure daher nicht mit organischen Absorptionsmitteln wie Fließpapier (Löschpapier) aufgenommen werden, sondern mit Wasser stark verdünnt werden. Auch Einmal- oder Einweghandschuhe bieten keinen Schutz, da Salpetersäure sowohl mit Nitril als auch mit Latex sofort unter starker Hitzeentwicklung reagiert. Dies kann sogar zur Entzündung dieser Handschuhe führen.

4.2.1.3 Reaktion mit Wasser

Sowohl chemisch reine Stoffe als auch entsprechende Verbindungen besitzen die Eigenschaft, spontan mit Wasser unter Freisetzung von Wärme zu reagieren, wobei sich entstehende Reaktionsprodukte selbst entzünden können.

So ist metallisches Natrium (Alkalimetalle) hoch reaktiv und entzündet sich bei Zutritt von Feuchtigkeit. Es muss daher unter Inertbedingungen gelagert werden, meistens in Paraffinöl oder Petroleum. Auch Aluminiumpulver reagiert mit Wasser selbstentzündlich. Magnesiumspäne können leicht entzündet werden. Bei Zutritt von Wasser brennt hochdisperses Magnesium explosionsartig ab, da Wasserstoff freigesetzt wird. Brennende Magnesiumbauteile sind daher mit Wasser nicht zu löschen (Motorenbrände). Metallbrände sind nur durch Ersticken zum Ablöschen zu bringen (Sand, Erde, Pulverlöscher Klasse D).

Wird zu ungelöschtem Kalk (Brantkalk) Wasser zugegeben, so tritt eine starke exotherme Reaktion auf (Löschen von Kalk: 400 °C). Die erreichbaren Temperaturen sind für benachbartes oder gar anliegendes brennbares Material so hoch, dass dieses entzündet werden kann.



Die Reaktionswärme beträgt $\Delta H = 65,5 \text{ kJ/mol}$ und führt zu brandgefährlichen Temperaturen, da diese höher liegen als die Zündtemperaturen von anliegenden brennbaren Materialien.

Aluminium- bzw. Magnesiumphosphide (Schädlingsbekämpfungsmittel) setzen bei Feuchtigkeitseinwirkung hochgiftigen Phosphorwasserstoff (Phosphin) frei, der selbstentzündlich ist.

Neben der Lagerungstemperatur, dem Sauerstoffvolumenanteil und Luftbewegungen beeinflusst Wasser den Selbstentzündungsvorgang gelagerter Schüttgüter (siehe Punkt 4.2.1.7). Hierzu zählt gebundene Feuchtigkeit im Schüttgut und Wasserzugabe auf die Schüttungsoberfläche und auch der in der Umgebungsluft befindliche Wasserdampf (relative Luftfeuchtigkeit).

Eine besondere Bedeutung besitzt im Nachfolgenden der Vorgang der Adsorption, der streng betrachtet als physikalischer Prozess zu bezeichnen ist. Nur im Einzelfall kann nach einer Chemisorption von chemischer Reaktion gesprochen werden. Da aber bei der Adsorption von z. B. Sauerstoff oder anderen reaktiven Stoffen sich nach erfolgter Adsorption chemische Reaktionen anschließen können, wird dies hier behandelt.

Bei dem Prozess der Adsorption werden die sich anlagernden Partikel als Adsorbat und das Oberflächenmaterial als Adsorbens bezeichnet. Die Adsorption ist bis auf einige Ausnahmen immer exotherm, d. h. es kommt in Folge der Anlagerung an ein Adsorbens zu einer Temperaturerhöhung ΔT . Es verringert somit seine potentielle Energie und gibt diese Differenz als Adsorptionswärme ab. In englischsprachiger Literatur wird dafür häufig der Begriff „heat of wetting“ verwendet. Dies beinhaltet sowohl die Adsorptionswärme, als auch möglicherweise auftretende Lösungswärmen, die sich mit der Adsorptionswärme überlagern können. Da in der Regel z. B. Kohle keine zu lösenden Salze enthält, entspricht die Heat of wetting dann der Adsorptionswärme.

Werden die freien Moleküle aufgrund von Dipolwechselwirkungen (Van-der-Waals-Kräfte) am Adsorbens angelagert, spricht man von physikalischer Adsorption (Physisorp-

tion). Diese Kräfte wirken über große Entfernungen, sind jedoch relativ gering. Dieser Vorgang ist reversibel, d.h. das Adsorbat kann chemisch unverändert wieder vom Adsorbens getrennt werden (Desorption). Werden die Moleküle aber über die stärkeren Valenz-Kräfte am Adsorbens gebunden, so spricht man von chemischer Adsorption (Chemisorption). Als Folge dieser Bindung wird das Adsorbat in seiner chemischen Natur verändert, wobei der Prozess nicht immer direkt reversibel ist.

Eine klare Trennlinie zwischen Physi- und Chemisorption kann jedoch nicht gezogen werden, da es in der Praxis häufig zu Überlagerungen von beiden Sorptionsmechanismen kommt. Mischformen liegen energetisch zwischen denen der Physi- und Chemisorption (z. B. Wasserstoffbrückenbindung). Bedecken die Moleküle des Adsorbats nur in einer Schicht die Oberfläche des Adsorbens, so spricht man von monomolekularer Adsorption (Monolayer). Kommt es darüber hinaus zu einer weiteren Anlagerung von Molekülen, so handelt es sich um eine Mehrschichtadsorption (Multilayer). Hierbei gilt: je umfassender die anfängliche Oberflächenbedeckung (Anzahl Molekülschichten), desto kleiner die Adsorptionswärme.

Bei der Adsorption von Wasser z. B. an der Kohleoberfläche wird eine Adsorptionswärme von bis zu 85 kJ kg^{-1} (Maximum) frei. Je geringer die Ausgangsfeuchte der Schüttung ist, desto deutlicher ist dieser Effekt.

Werden im Experiment 3 kg vakuumgetrocknete Kohle mit einem an Feuchtigkeit gesättigten Strom aus Luft durchströmt, so konnten aufgrund der Kondensation und Adsorption während dieser Zwangsdurchströmung die Schüttungen in einen kritischen Zustand gebracht werden. Auch Kohlenstaub erwärmte sich beim Durchspülen mit gesättigter feuchter Luft; getrocknete Proben erwärmten sich dabei deutlich schneller als das Ausgangsmaterial, da bei trockener Kohle mehr freie Oberflächen für die Adsorption von Wassermolekülen zur Verfügung steht als bei feuchter Kohle. Ein Umschlag in kritisches Verhalten (verbunden mit einem Abbrand) wurde aber selten beobachtet.

In der Praxis zeigt sich, dass Braunkohlenstaub vergleichsweise leicht in einen kritischen Zustand überführt werden kann, wenn ein Wärmestau gegeben ist. Dieser ist unschwer herbeizuführen, weil die Wärmeleitfähigkeit des Staubes sehr gering ist. Nicht unberücksichtigt bleiben darf der Effekt der zunehmenden Erwärmung, der zu erhöhten Reaktionsraten führt (Gesetz von van t'Hoff).

Braunkohlenbrikettabriev weist ebenfalls eine aktive Oberfläche auf, so dass bei Wasser- und Sauerstoffzutritt eine Erwärmung erfolgt, die zur Entzündung führen kann.

Steinkohle neigt im Vergleich zu Braunkohle in geringerem Maße zur Selbstentzündung.

Sowohl durch eine externe Wasserzugabe (Regen) als auch durch eine rasche Erhöhung der relativen Luftfeuchtigkeit können zuvor unterkritisch gelagerte Schüttungen in einen kritischen Zustand gebracht werden.

Großvolumig angehäufte Schüttgüter und Kohlehalden werden später separat in Abschnitt 4.2.1.7 besprochen.

4.2.1.4 Reaktionen bei Kontakt mit anderen Materialien

Chemische Substanzen können bei Kontakt mit anderen Materialien teilweise unter Freisetzung sehr hoher Wärmemengen reagieren. Dabei können Brände oder Explosionen gezündet werden. Eine vollständige Aufzählung kritischer Substanzen und Kontaktpartner ist hier nicht möglich. Die Sicherheitsdatenblätter, Produktinformationen, Gefahrstofflisten und die Fachliteratur sind immer zu berücksichtigen. Im Einzelfall ist daher zu prüfen, ob das beschriebene Sicherheitsrisiko vorhanden war. Gelegentlich müssen sogar Versuche durchgeführt werden, um die reale Gefahr zu bestimmen.

Zur Selbsterhitzung neigen z. B. ölkontaminierte Eisenfeinspäne, einige metallorganische Verbindungen und Metallsulfide.

Spezielle Substanzen, die der chemischen Familie der Farb- und/oder additiven Konzentrate in der Polymermatrix (Pulver) zugeordnet werden, können spontane Selbstentzündung zeigen (z. B. bei der Zumischung zu Polymeren während des Extrusionsprozesses bei hoher Temperatur).

Eine spezielle Kategorie in Hinblick auf Reaktionen mit anderen Stoffen bilden die Oxidations- bzw. Reduktionsmittel. So ist Calciumhypochlorit $\text{Ca}(\text{OCl})_2$ selbst nicht brennbar, aber ein starkes Oxidationsmittel. Es wird häufig zur Wasserpflege in Schwimmbädern benutzt (Biozid). Calciumhypochlorit reagiert mit einer Vielzahl anorganischer und organischer Stoffe, z. B. bei schadhafte Verpackungen, heftig unter Wärmefreisetzung, die zur Entzündung führen kann. Grundsätzlich ist ein Kontakt mit brennbaren Stoffen zu vermeiden. In der Wärme oder am Licht zersetzt sich das Calciumhypochlorit schon ab $100\text{ }^\circ\text{C}$ (Schmelztemperatur) und es besteht Explosionsgefahr. Bei Temperaturen $>177\text{ }^\circ\text{C}$ siedet es unter Zersetzung, wobei auch eine Reaktion mit sich selbst beschrieben wird.

Als starkes Oxidationsmittel kann es nicht nur leicht oxidierbare Stoffe bei Kontakt entzünden, sondern es können sich auch explosionsfähige Gemische ausbilden. Mischungen mit organischen Stoffen wie feinverteilte Kohle, Holz, Mehl, Zucker, Öle, Fette oder Terpentin u. a. können heftig explodieren. Verunreinigungen mit 1 % organischem Material können bereits zur Entzündung führen und erhöhen die Empfindlichkeit gegenüber Erwärmung.

So entzündet sich Glycerin spontan bei Mischung mit Calciumhypochlorit innerhalb weniger Minuten; dies kann schon bei geringsten Restmengen in Behältern der Fall sein, wenn Calciumhypochlorit zugegeben wird. Bei Zugabe von Wasser zum Hypochlorit entsteht eine erhebliche Reaktionswärme und die gebildeten Gase führen zum Zerknall von Behältern oder zur Explosion, zumal sich Sauerstoff entwickelt. Die Zersetzung von Calciumhypochlorit wird bei Anwesenheit von Eisenoxid (Rost) durch dessen katalytische Wirkung begünstigt.

Wird Calciumhypochlorit technisch hergestellt, entsteht meist ein gemischtes Chlorid-Hypochlorit-Salz mit dem Namen Chlorkalk. Dieses gilt als industrielle Vorstufe des Calciumhypochlorit und hat die ungefähre Zusammensetzung:



Eine Besonderheit in Zusammenhang mit chemischen Reaktionen stellen die Katalysatoren dar. Katalysatoren sind im chemischen Sinne Stoffe, die die Geschwindigkeit einer chemischen Reaktion beeinflussen, ohne dabei selbst verbraucht zu werden. Sie verfügen über folgende Eigenschaften:

- liegen nach einer Reaktion unverändert vor,
- beschleunigen eine Reaktion (erhöhen die Reaktionsgeschwindigkeit),
- verringern die Aktivierungsenergie,
- wirken selektiv, d. h. bestimmte Reaktionen benötigen bestimmte Katalysatoren.

So zeigen z. B. Katalysatoren aus hochaktiven Platinverbindungen, die für die Vernetzung von additionsvernetzenden, lösemittelfreien Siliconen eingesetzt werden, eine hohe Aktivität gegenüber Substanzen mit aktivem Wasserstoff. Deshalb sollten die unverdünnten Katalysatoren nicht direkt mit Siloxanvernetzern in Kontakt kommen, um eine spontane, unkontrollierte Wasserstoffabspaltung zu vermeiden. Vor allem in Gegenwart von reaktiven organischen Lösemitteln (z. B. Ester, Ketone) und brennbaren Materialien mit großer Oberfläche (z. B. Papier) kann diese Kombination zur Selbstentzündung führen.

4.2.1.5 Trocknende Öle, Fette

Organische Verbindungen (Stoffe) können auch Mehrfachbindungen enthalten. Sie werden als ungesättigt bezeichnet, weil nicht alle Valenzen des Kohlenstoffs gesättigt sind bzw. weil die Molekülstruktur eine oder mehrere C-C-Doppel- oder Mehrfachbindungen enthält ($C = C$, $C \equiv C$). Beispiele sind die ungesättigten Fettsäuren oder die ungesättigten Kohlenwasserstoffe wie Alkene, früher als Olefine (anteilig Doppelbindungen) und Alkine (anteilig Dreifachbindungen) bezeichnet. Die Substanzen mit Dreifachbindungen sind stets hochreaktiv, wie z. B. Acetylen. Sehr viele Naturstoffe enthalten ungesättigte Verbindungen, wie trocknende Öle (Leinöl, Hanföl u. a.), d. h. sie weisen Mehrfachbindungen auf, die bei Reaktion mit Luftsauerstoff exotherm aufbrechen. Die Reaktion ist eine typische Additionsreaktion und wird auch als Autooxidation bezeichnet.

Eine solche Autooxidation ist aber bei gesättigten Verbindungen (Alkanen), wie Methan, Propan, Ottokraftstoff, Dieselmotorkraftstoff, Paraffin u. a., die also keine Mehrfachbindungen aufweisen, nicht möglich, weil ihre C-H- und C-C-Bindungen relativ stabil sind und nicht einfach aufgebrochen werden können.

Werden Öle mit Mehrfachbindungen auf Textilien oder Pads aufgebracht, sind sie wegen deren großer innerer Oberfläche zwangsläufig feinverteilt und gleichzeitig infolge der zahlreichen Luftpölster thermisch verdämmt. Betroffen sind also brennbare Materialien, die eine große Oberfläche aufweisen wie z. B. alle Textilien, Dämmplatten, Schleifstaub und ähnliches.

Eine wichtige Kennzahl zur Abschätzung der Neigung zur Selbsterwärmung ist die so genannte Jodzahl. Sie gibt an, wie viel Gramm Halogene, berechnet als Jod, mit 100 g der zu untersuchenden Substanz reagieren. Nur ungesättigte Verbindungen können in Form einer einfachen chemischen Reaktion Verbindungen mit den Halogenen eingehen

(Additionsreaktion). Die Jodzahl ist also ein Maß für den ungesättigten Charakter einer Substanz, d.h. hohe Jodzahlen zeigen einen hohen Gehalt an Öl-, Linol-, Linolensäuren und anderen ungesättigten Fettsäuren an. Es haben sich unter vielen Bezeichnungen im kriminalistischen Bereich folgende Bezeichnungen eingebürgert:

Bezeichnung	Jodzahlbereich	Beispiel	Jodzahl
nicht-trocknendes Öl	< 95	Rizinusöl	84
halb-trocknendes Öl	95 bis 126	Sojaöl	126
trocknendes Öl	> 126	Leinöl	182

Trocknende Öle sind daher:

Lein-, Mohn-, Holz-, Soja-, Tabaksamen-, Walnuss-, Perilla-, Kürbiskern-, Maiskern-, Sonnenblumen-, Weizenkeim-, Hanföl und Lebertran

Halbtrocknende Öle sind:

Soja-, Traubenkern-, Baumwollsamensamen-, Mais-, Rüb-, Sesamöl und Waltran

nichttrocknende Öle sind:

Rizinus-, Erdnuss-, Palm-, Mandel-, Oliven-, Palmkern- und Kokosnussöl, Schweineschmalz, Butterfett

Je höher also die Jodzahl ist, desto mehr ungesättigte Bindungen liegen vor und desto gefährlicher ist das Öl hinsichtlich einer Selbsterhitzung. Es ist bei der Übernahme von Daten kritisch vorzugehen, weil die Bestimmungsmethode die Werte beeinflusst. Es ist deshalb nicht überraschend, wenn für den gleichen Stoff unterschiedliche Werte genannt werden. Neuere Untersuchungen zeigen, dass die Jodzahl allein kein sicheres Entscheidungskriterium für die Neigung zur Selbsterhitzung darstellt.

Wie bereits erwähnt, erfolgt bei der Autooxidation eine exotherme Reaktion. Die dabei frei werdende Reaktionswärme wird bei bestimmungsgemäßer Handhabung der ungesättigten Öle und Fette an die Umgebung abgeführt und ist deshalb ungefährlich. So sind Anstriche während der Antrocknung völlig ungefährlich, da eine effektive Wärmeableitung zur Luft und zum Untergrund erfolgt. Werden bei der Verarbeitung insbesondere poröse, brennbare Materialien mit Ölen kontaminiert, so kann durch die stark vergrößerte Oberfläche die Sauerstoffreaktion erheblich intensiver verlaufen und die Wärmeentwicklung entsprechend intensiver sein. Die entstehende Reaktionswärme wird innerhalb dieses porösen Materials zwangsläufig akkumuliert, so dass ein Wärmestau vorliegt, der zur Selbstentzündung führt.

Ölgetränkte Textilien, die flach ausgebreitet sind, bleiben unkritisch; werden sie aber angehäuft, so wird die Wärmeableitung erheblich behindert, so dass sich ein Wärmestau bilden kann. Wenn diese Wärme nicht abgeführt werden kann, kommt es zunächst zu

einer Geruchs- und Rauchentwicklung und danach zur Entzündung der kontaminierten Textilien; Gleiches gilt für andere Faserstoffe und Stäube. Selbsterwärmungen werden selbst bei der Verwendung von inerten, nicht brennbaren Trägerstoffen wie Glaswolle, Mineralwolle u. ä. beobachtet, wenn diese nur über eine ausgeprägte innere Oberfläche verfügen.

Nach wenigen Stunden und bei geringen Öl-Mengen kann eine Selbsterhitzung bis zur Selbstentzündung eintreten. Auch bei Firnissen, Holzölen und Hartwachsölen ist diese Selbsterhitzung in Verbindung mit Textilien oder Putztüchern zu erwarten. Schon die in Wischtüchern gespeicherte Mengen werden brandgefährlich, wenn sie selbstverdämmend oder verdämmt abgelegt werden.

Besondere Vorsicht ist geboten bei Farben, Beizen und Anstrichmittel auf Naturölbasis, die als umweltfreundlich („biologisch“, „ökologisch“, Naturfarben, Biofarben, Ökofarben) angeboten werden. Die auf den Verpackungen ausgewiesene Unbedenklichkeit gilt aber nur aus ökologischer Sicht. Derartige Erzeugnisse sind bei Kontakt mit Tüchern o.ä. eher als gefährlich einzustufen, da sie ungesättigte Fettsäuren in nicht unerheblicher Menge enthalten.

So können mit Druckfarben auf Naturölbasis verunreinigte Materialien wie Putzlappen, Papierreinigungstücher und Schutzbekleidung selbst nach einigen Stunden eine spontane Selbstentzündung hervorrufen. Dieser Sachverhalt ist insbesondere deshalb zu beachten, weil der Trend zu solchen Farben eindeutig zunimmt.

Somit ist es mehr als logisch, dass anfallende Abfälle mit Anhaftungen von zur Selbstentzündung neigenden Stoffen – wie leinölgetränkte Putzlappen, Lackreste und Mischungen u. ä. – in einem metallischen Abfallbehälter mit selbstschließendem Deckel aufzubewahren und nach Betriebsschluss in einem gekennzeichneten Bereich außerhalb der Betriebsgebäude, jedenfalls in einem eigenen Brandabschnitt, bis zur endgültigen Entsorgung zwischenzulagern sind. Verunreinigte Materialien sollten am Ende eines jeden Arbeitstages vom Arbeitsplatz entfernt gelagert werden. Im Zweifel empfiehlt sich auch eine Unterwasserlagerung.

Allgemein besteht in Textilien oder ähnlich speicherfähigen Materialien, die mit oxidativ trocknenden Produkten (Produkte aus Naturfarben, Bioöle) getränkt sind, die Gefahr der Selbstentzündung. Im Zweifelsfall sind die Produktbeschreibungen des Händlers und das Sicherheitsdatenblatt des Herstellers oder die auf den Gebinden angebrachten Warnhinweise heranzuziehen, weil die meisten selbstentzündlichen Produkte nur einen wenig aufschlussreichen Handelsnamen tragen.

Auch visuell gereinigt erscheinende Textilien, die dennoch Reste von Fetten aus der Gastronomie oder der Kosmetikindustrie enthalten können, neigen nach dem Bügeln oder Heißmangeln bei dichter Lagerung im Stapel oder nach Trocknung in einem Wäschetrockner zur Selbsterhitzung. Der Bügelvorgang und das Heißmangeln liefern die Startenergie (Aktivierungsenergie). Solche Brände sind in gewerblichen Wäschereien bei Vernachlässigung der Sicherheitsvorschriften typisch. Zu verhindern sind sie nur durch hinreichend lang andauernde Abkühlung der Wäschestücke in kleinen Stapeln (Vereinzelung).

4.2.1.6 Beschichtungsstoffe

Weiterhin sind Beschichtungsstoffe, deren Ablagerungen leichtentzündlich sind, wie Nitrocelluloselacke (Nitrolacke) und Beschichtungsstoffe, die bei der Trocknung Wärme entwickeln, und Beschichtungsstoffe aus lufttrocknenden Ölen bzw. Kunstharzen (Öllacke, Kunstharzlacke) oder lösemittelfreien oder lösemittelarmen Mehrkomponenten-Reaktionslacke, wie Epoxidharzlacke oder PUR-Lacke, auf getrennten Lackiereinrichtungen zu verarbeiten. Vereinfacht ausgedrückt: Beim gleichzeitigen Verarbeiten von NC-Lacken und Alkydharzlacken (Kunstharzlack) sind Selbsterhitzungsvorgänge nicht auszuschließen. Ist eine getrennte Verarbeitung nicht möglich, sind in der Lackieranlage vor Aufbringen eines weiteren Lacksystems die Filter zu wechseln und die Auflage-, Aufhänge- und Transporteinrichtungen gründlich zu reinigen. Auch durch einen Kontakt zwischen lösemittelhaltigen Reinigern und Beschichtungsstoffen kann eine Selbstentzündung ausgelöst werden.

Auch dürfen keine natürlichen pflanzlichen Wachse mit NC-haltigen Lacken oder Lackbeizen am gleichen Spritzstand verarbeitet werden, da hierbei ebenfalls die Gefahr der Selbstentzündung besteht.

Aus den genannten Gründen muss in Maler- und Lackierbetrieben grundsätzlich von der Möglichkeit einer Brandentstehung durch Selbstentzündung ausgegangen werden. Die verarbeiteten Flüssigkeiten sind vollständig zu ermitteln.

4.2.1.7 Schüttgüter, Kohlehalden

Selbstentzündungen von brennbaren Materialien können sowohl bei verfahrenstechnischen Prozessen als auch beim Transport oder Lagerung von Schüttgütern auftreten. Verschiedene Parameter, wie die Materialeigenschaften, die Lagerungsbedingungen und die Geometrie der Schüttung, beeinflussen den Selbstentzündungsvorgang, der auch durch den Massenverlust und einen charakteristischen Temperatur-Zeitverlauf charakterisiert wird.

Im kritischen Fall führt eine Reduzierung des Sauerstoffs im Schüttgut zu einer Erhöhung der Selbstentzündungstemperatur. Wassereintritt (z. B. Regen) als auch eine rasche Erhöhung der relativen Luftfeuchtigkeit kann eine zuvor unterkritisch gelagerte Schüttung in einen kritischen Zustand überführen. Zurückzuführen ist dies auf den zusätzlichen Wärmetransport in das Schüttgut durch Kondensation von Wasserdampf und Adsorption von Wassermolekülen an porösen Partikeloberflächen.

Versuche belegen, dass gleichförmige Konvektionsströmungen (Wind) in der Schüttgutumgebung die Selbstentzündungstemperatur kaum beeinflussen, aber zu einer deutlichen Reduzierung der Induktionszeit führen. Einseitige Anströmungen der Proben sorgten bei kritischen Lagerungstemperaturen für eine Verschiebung des Zündortes zur windabgeneigten Seite.

Die Parameter, die die Selbstentzündung von Schüttgütern und Stäuben nach heutigem Kenntnisstand beeinflussen, lassen sich in drei Gruppen unterteilen:

- Materialeigenschaften des Schüttgutes
 - Partikelgröße, Korngrößenverteilung, Porosität, gebundene Feuchtigkeit, Wärmeleitfähigkeit, Schüttdichte, spezifische Wärmekapazität, spezifische Oberfläche, chemische Struktur, Diffusionskoeffizient
- Geometrie der Schüttung
 - Volumen-Oberflächen-Verhältnis, Hangneigung, Neigungswinkel
- Umgebungsbedingungen
 - Lagerungstemperatur, Sauerstoffvolumenanteil, relative Luftfeuchtigkeit, Wasserdampfzugabe und Luftbewegungen.

Diese Ergebnisse und Erkenntnisse sind in Modellversuchen erzielt worden. Die qualitative Übertragung auf reale, also großvolumige Halden ist zulässig, da hier Erfahrungswissen vorliegt.

Bei größeren Lagermengen von Braunkohle, aber auch von Steinkohle, wird eine Selbsterwärmung festgestellt. Die Zündung der Kohle erfolgt im Inneren der Halden, wo eine Kompaktierung vorliegt, die geringe Wärmeleitfähigkeit einen Wärmetransport erschwert und der sich dadurch ergebende Wärmestau eine Selbsterwärmung begünstigt. Die Ad- und Chemisorption von Luftsauerstoff ist hier von besonderer Bedeutung, so dass ein hoher Dispersionsgrad der Kohle die Gefahr erhöht.

Neben den oberirdischen Bränden von Kohlehalden sind auch in Bergwerken Selbstentzündungen von Steinkohle festgestellt worden.

Bei Palettenlagerung von Bündelbriketts bestimmter regionaler Herkunft wird zu Recht auf die Gefahr der Selbsterhitzung hingewiesen. Es sind deshalb dichte Lagerungen dieser Paletten zu vermeiden. Das Aufbrechen der Briketts begünstigt die Reaktion mit dem Luftsauerstoff.

Im vermehrten Maß werden Brände in großen Schüttungen u. a. mit Schredderfraktionen der Recyclingbetriebe beobachtet, weil hier fast unkontrollierbare Randbedingungen u. a. die Selbsterwärmung begünstigen. Im Brandfall werden die Heizwerte der heizwertreichen Abfälle häufig unterschätzt. Die Problematik besteht in der komplexen Wechselwirkung zwischen biologischen Abbauvorgängen, verbunden mit der chemischen Selbsterwärmung des Materials, dem Aufbau und der inneren Struktur des Lagers und den äußeren Einflüssen, wie z. B. die meteorologischen Bedingungen.

Nicht ausgeschlossen werden dürfen die allein chemisch bedingten Selbstentzündungen infolge des Vorhandensein reaktiver Abfallkomponenten wie z. B. Lackrückstände, Kunstharz- und Kleberrückstände u. a. bei ungenügender Beachtung des Abfallschlüssels. Weiterhin werden Selbstentzündungsvorgänge durch im Schredderprozess erzeugte Metallspäne (Eisen, Aluminium) angestoßen, die einen katalytischen Effekt bewirken

können. Auch die durch den Schreddervorgang bewirkte Erwärmung des Schreddergutes und dessen Lagerung in Schüttungen kann gemessen an den thermischen Voraussetzungen im Weiteren eine Selbstentzündung auslösen.

Um eine Selbstentzündung zu verhindern und das Ausmaß der Schäden zu reduzieren, bedarf es besonderer Maßnahmen des Vorbeugenden Brandschutzes (Temperaturmessung, Stapelgeometrie, Brandabschnitte, Lagerungsbedingungen u. a.).

Für die Lagerung fester, heizwertreicher Abfälle (Weiterverarbeitung zu sog. Ersatzbrennstoffen; EBS) ist die Herstellung von Pressballen mit Stabilisierung durch mehrlagige Folienumwicklung als Stand der Technik verfügbar und eine gute Präventionsmaßnahme.

4.2.1.8 Zerfall von Acetylen

Acetylen gehört zu den Verbindungen, die in der Praxis nur unter bestimmten Umständen gefahrlos zu handhaben sind. Acetylen (Ethin) zerfällt nämlich in exothermer Reaktion zu Wasserstoff und Ruß unter Freisetzung von 8.733 kJ/kg und kommt daher als Brandursache in Betracht.

Die Zerfallstemperatur beträgt bei Atmosphärendruck 640 °C. Die Flammentemperatur bei Verbrennung in Luft beträgt 2.250 °C und mit Sauerstoff 3.100 °C. Acetylen stellt daher das wichtigste Schweißgas dar. Der Explosionsbereich (s. Tabelle im Anhang) dieses hochentzündlichen Gases ist sehr groß (UEG 22,3 Vol-%; OEG 82 Vol-%).

Acetylen lässt sich nicht verdichten oder verflüssigen (Gefahr der Selbstzersetzung bei einem Druck von mehr als 2 bar). Acetylen kommt deshalb in Druckgasflaschen in den Handel, die mit einer porösen Masse gefüllt sind (Calciumsilikathydrat, Kieselgur u. a.; siehe z. B. CR 14473:2003 und www.bam.de: „Acetylen“). Diese porösen Massen sind mit Aceton getränkt. Dadurch wird die explosive Selbstzersetzung unter hohem Druck verhindert. Bei einem Flammenrückschlag, z. B. bei schadhafter Flammenrückschlagsicherung, in das Innere der Druckflasche wird durch diese Lagerungsart auch der explosionsartige Zerfall des Acetylens verhindert. Diese Sicherungsmaßnahmen sind notwendig, da sonst die Brand- und besonders die Explosionsgefahr der Flasche schon bei geringfügigen Temperatur- oder Druckerhöhungen zu hoch wäre.

Acetylenflaschen dürfen nicht übermäßig erwärmt werden, weil sonst der exotherme Zerfall des Acetylens eintritt. Erwärmt sich eine Acetylen-Druckflasche, so muss die erwärmte Flasche aus sicherer Entfernung ständig wassergekühlt werden. Ein Ablassen des Gases bei einer erwärmten Flasche hat zu unterbleiben, weil dadurch die Berstgefahr nicht reduziert werden kann und darüber hinaus in der Umgebung eine Explosionsgefahr herbeigeführt wird.

Nach den Technischen Regeln TRAC 208 muss eine erwärmte Acetylenflasche 24 Stunden im Wasserbad gekühlt werden, um die Restgefahr zu beseitigen. Auch das vfdB-Merkblatt Acetylen und die Sicherheitsdatenblätter der Gaslieferanten bestätigen diese Maßnahmen. Ist eine Acetylenflasche einer hohen Temperatur, etwa bei einem

Brand, ausgesetzt, so ist auch noch 24 Stunden nach Entfernen der Hitzequelle mit einem Bersten der Flasche durch Acetylenzersetzung zu rechnen, so dass noch bis 48 Stunden Kühlungsmaßnahmen erforderlich sein können.

Gerade bei Bränden ist auf das Vorhandensein von Acetylenflaschen besonders zu achten. Selbst lokale Hitzeeinwirkungen ($> 60\text{ °C}$) können die gefährliche Zersetzung von Acetylen auslösen. Die Temperatur der Flasche ist auf der ganzen Länge zu überwachen, denn eine erneute Erwärmung infolge Zersetzung ist auch nach Stunden noch möglich.

4.2.2 Offene Flammen, Offenes Feuer, Offenes Licht

Unter Offene Flammen versteht man alle Arten von Flammen, bei denen der Luftzutritt nicht behindert ist. Die einfachste Ausführung einer Offenen Flamme ist der brennende Span, das Streichholz oder die brennende Kerze. Eine offene Flamme ist auch gegeben beim Gas- oder Benzinfeuerzeug. Auch der Spiritus- oder Benzinkocher und alle Gasgeräte mit offener Flamme, Bunsenbrenner und Kleingeräte, in denen feste Brennstoffe offen verbrannt werden (Rechauds), gehören dazu.

Im offenen Kamin brennt ebenfalls eine zumindest teilweise offene Flamme, aber diese Einrichtung gehört wegen des Teileinschlusses zu den Feuerstätten. Im Kachelofen brennt auch eine Flamme, aber sie ist nicht offen, da sie innerhalb einer Feuerstätte brennt. Für die Feuerstättenbeschaffenheit sind entsprechende Verordnungen (z. B. FeuV) und Errichtungsnormen zu beachten (siehe Punkt 4.3.3).

Der Begriff Offenes Feuer ergibt sich, wie der Begriff Offene Flammen, aus dem Sprachgebrauch und ist jedes Feuer, das nicht in einer geschlossenen Feuerstätte entzündet wird (also unverwahrtes Feuer, offene Feuerstätten, Schneid-, Schweiß- und Lötgeräte und alle sonstigen Geräte und Anlagen, in denen Feuer entzündet wird, das nicht umschlossen ist). Offenes Feuer findet sich also in Geräten, in denen Brennstoffe mit offener Flamme verbrannt werden. Kein offenes Feuer ist dagegen glimmender Tabak (Tabakglut, siehe Punkt 4.2.3).

Offenes Licht liegt vor, wenn die zur Beleuchtung benutzte Flamme seitlich oder nach oben ungeschützt ist (wie Offene Flamme). Typische Vertreter sind die Kerze und die Fackeln. Die allseits umschlossenen Petroleumlampen sind kein Offenes Licht, sondern Beleuchtungsgeräte; auch Kerzen in Laternen sind daher kein Offenes Licht.

Früher oder auch im Ausland verfügbare Streichhölzer werden durch Reibung an beliebigen harten Materialien gezündet; sie sind deshalb handhabungsunsicher. Heute sind aber Sicherheitsstreichhölzer üblich, die nur an vorgefertigten Reibflächen zu zünden sind. Sofern sie Streichholz-Briefchen entnommen werden, ist gegebenenfalls auf die beim Entnehmen entstehenden Passspuren zu achten. Mit den Kleinflammen der Streichhölzer werden Temperaturen von 700 °C bis 800 °C erreicht; die Leistung dieser Flamme beträgt etwa $50\text{ Watt (J s}^{-1}\text{)}$. Diese Flammentemperaturen liegen oberhalb aller bekannten Zündtemperaturen und Flammpunkte, so dass es sich hier um eine der ein-

fachsten und effektivsten Zündquellen handelt. Gleiches gilt auch für die Feuerzeuge, deren Flammentemperaturen sogar höher liegen.

Zur Entzündung einer Kerzenflamme bedarf es der Zündenergie, die aus einer Kleinflamme stammen kann (Streichholz- oder Feuerzeugflamme). Nach dem Verflüssigen des Waxes im Dochtbereich und nachfolgendem Verdampfen im Docht werden die entstandenen Dämpfe entzündet. Dadurch wird durch Rückstrahlung der Feststoff der Kerze (Wachs, Stearin) verflüssigt, im Docht durch Kapillarwirkung transportiert und im Flammenbereich verdampft. Ist der so nachgelieferte Dampf entflammt, kann bei Abstimmung von Wachs, Kerzenabmessung und Docht ein stabiler Abbrand erreicht werden. Die zum Entzünden notwendige Primärflamme kann entfernt werden, wenn der Wärmegewinn aus dem Kerzenabbrand größer als der Wärmeverlust an die Umgebung ist, wenn sich also ein stabiler Kreisprozess einstellt. Der Verbrennungsprozess wird beendet, wenn das Brennmaterial erschöpft ist oder der Wärmeverlust größer als der Wärmegewinn ist oder der Sauerstoffgehalt unter 16 % abgesenkt wird.

Da die Kerzenflamme offen brennt, ist sie bei Annäherung an brennbare Stoffe oder beim Totalabbrand immer brandgefährlich und häufige Ursache einer fahrlässigen Inbrandsetzung. Da der Abbrand sehr langsam und vor allem massenproportional erfolgt, kann eine Kerze als einfachstes Mittel für eine willentlich zeitverzögerte Inbrandsetzung eingesetzt werden.

Das Betreiben von Offenen Flammen und Offenem Feuer und auch das Rauchen (siehe Punkt 4.2.3) sind wegen der oben geschilderten Eigenschaften und der damit einhergehenden Gefahren in Umgebungen mit leicht entzündlichem Material grundsätzlich untersagt. Hierfür wurde das Verbotsschild der durchgestrichenen Zigarette nach VBG 125/DIN 4844 entwickelt, um auf die damit verbundene Brandgefahr aufmerksam zu machen.

Kerzen gibt es in unterschiedlichsten Ausführungen; einen besonderen Typ von Kerze stellt das Teelicht dar, das häufig in Rechauds verwendet wird. Deshalb wird es auch als Rechaudkerze bezeichnet. Hier wird Wachs mittels Docht in einem Becher aus Aluminium oder anderen unbrennbaren Materialien abgebrannt, wobei sich das Wachs im Becher vollständig verflüssigt.

Der Behälter weist am Boden punktuelle Ausbauchungen auf, die zu einer schmalen Luftschicht zwischen Teelicht und Aufstellfläche führen. Solche Teelichte gelten als brandsicher. Kippen die Teelichte um oder rutschen sie von einer schiefen Ebene ab, so besteht immer die Gefahr der Ankopplung der Flamme des Teelichtes an einen brennbaren Stoff.

Unter bestimmten Umständen, z. B. durch zusätzliche dochtbildende Fremtteile wie Dekore, werden Teelichte so überhitzt, dass ein Flächenabbrand oberhalb der verflüssigten Oberfläche entsteht, wobei infolge flächiger Verdampfung Flammen bis zu 20 cm bis 30 cm Höhe beobachtet werden. Die Brennstoffzufuhr erfolgt somit nicht mehr bestimmungsgemäß aus dem vom Docht abdampfenden Wachs, sondern aus der gesamten Fläche des im Becher siedenden Waxes. Werden mehrere Teelichte nebeneinander in geringem Abstand betrieben, so kommt es auch bei einem zunächst separaten Abbrand der einzelnen Teelichte schließlich zu einer Überhitzung aller Wachsflächen in den

Bechern, es siedet das Wachs. Es geht der Einzelabbrand in einen Simultanabbrand aller Oberflächen über, weil die Einzelflammen auf die Wachsoberfläche rückstrahlen, so dass ein mit der Zahl der Teelichte zunehmendes Flammenvolumen entsteht. Werden z. B. 100 sich berührende Teelichte in Form eines dekorativen Herzens aufgestellt, so zeigen sich anfangs eben 100 einzelne Flammen, die zu einem flächigen Simultanabbrand des Wachses in allen Teelichtbechern entarten; bei einem solchen Abbrand ergibt sich eine Flammenhöhe von über 2 Meter. Beim Löschen mit Pulver unter Druck kann es zu einem Auswurf des flüssigen Wachses kommen, so dass sich wegen des hohen Dispersionsgrades eine Verpuffung anschließen kann. Neben der unmittelbaren Gefährdung benachbarter brennbarer Gegenstände und Personen tritt somit auch die Gefahr einer Explosion (siehe Punkt 4.7) hinzu.

Mehrere Teelichte, die in den Innenraum eines auf der Grundfläche stehenden kegelförmigen Behälters (z. B. Weihnachtskegel mit ornamentalen Wandaussparungen) eingestellt werden, können durch Rückstrahlung und unvollständige Verbrennung zur Ausbildung einer explosiblen Atmosphäre im Kegelspitz und nach deren Entzündung zu einem schlagartigen Austritt von Flammen aus den Aussparungen im Kegelmantel führen. Dabei können benachbarte Materialien (Vorhänge, Dekorationen, Gestecke) leicht entzündet werden.

Bei allen offenen Flammen ist nur der leuchtende Bereich der Flamme visuell zu kontrollieren. Der Kohlenstoff-Abbrand führt zur Gelbfärbung der Flamme und suggeriert dadurch ein begrenztes Gefährdungsvolumen. Tatsächlich ist das Gefährdungsvolumen viel größer als die sichtbare Flamme, da auch außerhalb brandgefährliche Temperaturen vorherrschen.

Bei technischen Flammen, wie zum Beispiel beim Bunsenbrenner oder der Lötlampe oder des Gasbrenners ist daher ein erheblicher Sicherheitsabstand einzuhalten, der auch beim Flammenbrand von Bedeutung ist (siehe Punkt 1.3). Das Gefährdungsvolumen eines typischen Gasbrenners (Aufschweißbrenner), der auf Baustellen häufig Verwendung findet, ist am Beispiel des kleinsten Aufschweißbrenners (Becher- $\varnothing = 35$ mm) nachfolgend vermessen worden.

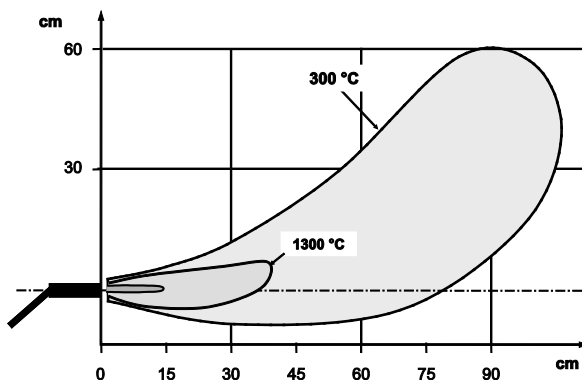


Abb. 8: experimentell bestimmtes Gefährdungsvolumen der Propan-Flamme eines Aufschweißbrenners, Becherdurchmesser 35 mm

Es steht außer Frage, dass die großvolumige keulenformige Isotherme von 300 °C die hohe Brandgefahr in der weiteren Umgebung der Flamme verdeutlicht. In der Praxis wird dieses durch Heißgase erzeugte große Gefährdungsvolumen häufig außer Acht gelassen. So wird angegeben, man habe andauernd auf den Sicherheitsabstand zur Flamme geachtet, wobei eben das Gefährdungsvolumen unberücksichtigt geblieben ist und eine Brandgefahr fahrlässig herbeigeführt wurde. Dringen die Heißgase in Spalte oder z. B. in hinterlüftete Fassaden ein, kann zunächst unbemerkt ein visuell nicht kontrollierbarer Brand entstehen. Besonders schadenswirksam ist das Eindringen der Heißgase und natürlich auch der Flamme in Dachhöhlräume beim Aufschweißen von Bitumenbahnen auf Holz, weil die Inbrandsetzung wegen der aufgeklebten Bitumenbahnen viel zu spät entdeckt wird und wegen des erschwerten Löschangriffs von einem Totalschaden des Brandobjektes ausgegangen werden muss.

Das zum Schutz von Rohranlagen oder Behältern gelegentlich durchgeführte Auftauen der Leitungen mit offener Flamme eines Gasbrenners oder einer Lötlampe führt sekundär zu einer hohen Brandgefahr, weil diese brandgefährlichen Arbeiten kaum sicherheitsgerecht durchgeführt werden können. Am Anwendungsort oder in der näheren Umgebung besteht eine unmittelbare Gefährdung durch Konvektion.

4.2.3 Glut

Wird in Holz oder in Kohle die pyrolytische Zersetzung bei Beflammung oder selbständigem Abbrand beendet, erlöschen auch die Flammen. Es schließt sich eine Verbrennung im Brenngut, genauer an der ausgebildeten Pyrolysekohlenschicht ohne Flammenbildung an, die als Glut bezeichnet wird. Diese Brände werden auch als Glutbrände bezeichnet (siehe Punkt 1.3.2). Die Verbrennung kann durch Zwangsbelüftung oder erzwungene Konvektion beschleunigt werden (z. B. Blasebalg, Anblasen, Zuluftklappen, Schornstein, Wind).

Geläufige Formen eines Glutbrandes sind der Holzkohle-Grill und das Schmiedefeuer (Esse); der Glutbrand führt zu geringeren Temperaturen als der Flammenbrand und ist im Allgemeinen längerandauernd. Die Emission elektromagnetischer Wellen erfolgt verstärkt im langwelligen Bereich (Wärmestrahlung). Das Löschen ist insofern erschwert, als der Glutbrand nur durch Abkühlung (typisch Wassereinsatz) oder Inertisierung vollständig zu löschen ist. Wegen des Rest-Sauerstoffgehalts gelingt das Ersticken nur ungenügend. Gerade aschebedeckte Kohlebriketts erscheinen erkaltet, weisen im Inneren häufig noch Unverbranntes auf, das mit dem Restsauerstoff reagieren kann. Vermeintlich völlig erkaltete Asche enthält vielfach noch in tieferen Schichten glimmende Teile und kann erheblich zeitverzögert zu einer sekundären Brandzündung führen, wie weiter unten noch zu erläutern ist.

Der Glutbrand schließt auch das flammenlose Glimmen mit ein (Glimmbrand). Typische Glimmvorgänge sind in Zellulose und im Tabak (Zigarette, Zigarre, Pfeifentabak) zu beobachten. Die Gluttemperatur in der Zigarette beträgt je nach Belüftung der Glutzone 650 °C bis 950 °C. An der Aschenoberfläche beträgt die Temperatur nur 300 °C. Gemessen an den innerhalb der Glut vorhandenen Temperaturen erscheint die Tabakglut stets brandgefährlich zu sein. Deshalb wird die Zigarette/Zigarre auch bei einem nicht korrekt durchgeführten Eliminationsverfahren oft zu Unrecht als Brandursache genannt.

Die Gesamtenergie in der Tabakglut verteilt sich nämlich auch auf das Volumen der die Glut einhüllenden Ascheschicht, die eine extrem große innere Oberfläche aufweist. Damit ist die Energie pro Flächeneinheit im Aschevolumen sehr gering. Die Ascheschicht mit ihrer hohen Porosität und der geringen Masse stellt auch einen sehr schlechten Wärmeleiter dar; anders formuliert bedeutet dies, dass sie einen hohen Wärmewiderstand besitzt, der zu einem steilen Temperaturgradienten führt, so dass die Temperatur an der Ascheoberfläche deutlich niedriger ist als die zentrale Gluttemperatur. Darüber hinaus wirkt die Ascheschicht als Sicherheitsgitter, ähnlich dem Davy-Effekt. Somit kann die Oberfläche der Asche die Mindestzündenergie für verschiedene Dämpfe nicht zur Verfügung stellen. Lediglich nach völliger Freilegung des Glutkernes bei gewaltsam aufgebrochener Glut ist eine Zündung mit letzter Sicherheit nicht auszuschließen, weil die genannten Erschwernisse für eine Zündung wegfallen können. Umfangreiche, weltweit durchgeführte Versuche belegen aber übereinstimmend, dass nur ganz wenige brennbare Dämpfe gezündet werden können.

Die Arbeitsgemeinschaft Feuerschutz (AGF) hatte in ihrem Forschungsbericht Nr. 10 insgesamt 42 Stoffe hinsichtlich ihrer Zündung durch die Glut von Zigarren und Zigaretten untersucht. Zündfähig erwiesen sich nur folgende Stoffe, die sich durch eine sehr niedrige Mindestzündenergie auszeichnen:

– Acetylen (Ethin)	C_2H_2
– Äthylenoxid (Ethylenoxid)	C_2H_4O
– Diäthyläther	$C_4H_{10}O$
– Phosphorwasserstoff (Phosphin)	H_3P
– Schwefelwasserstoff (Faulgas)	H_2S
– Schwefelkohlenstoff (Kohlenstoffdisulfid)	CS_2
– Wasserstoff	H_2

Feststoffe sind durch Tabakglut eher selten oder nur unter günstigen Umständen zu entzünden. Ein solcher günstiger Umstand wäre etwa der abstehende Span an einem Massivholzstück, weil dieser leichtentzündlich sein kann. Auch raue Oberflächen, wie etwa besonders sägeraue Bretter oder Balken könnten gezündet werden. An Schwindrissen ist ebenfalls eine Ankopplungsmöglichkeit gegeben. Auf massivem Holz entsteht nur eine Einbrennung, die nicht zum Vollbrand führt. Nachweislich geeignet für eine Zündung durch Tabakglut haben sich Textilien aus Baumwolle mit geringer Flächenmasse und auch Papiersorten mit geringer Flächenmasse, geringem inerten Füllstoffgehalt, hohem Holzanteil u. ä. erwiesen. Auch die Zündung zellstoffhaltiger Materialien ist mittels Tabakglut möglich.

Thermoplastische Kunststoffe entziehen sich einerseits durch ihr Schmelzen der Gefahrenzone der Glut. Darüber hinaus sind sie nicht glimmfähig. Ebenfalls reicht die über die Tabakglut verfügbare Energie nicht für eine Zündung aus. Duroplastische Kunststoffe lassen sich bedingt durch eine extrem hohen Pyrolyse- und Zündtemperatur und auch hohen Mindestzündenergie ebenfalls nicht durch Tabakglut entzünden.

In den Fällen, wo die Tabakglut verdämmt wird, also die Wärmeleitung behindert ist, etwa in Betten oder Abfallbehältern, kann diese sehr wohl brandzündend wirken, weil der Temperaturgradient von der Glut bis zur Aschenoberfläche verflacht und damit gefährliche Temperaturen auch auf der Aschenoberfläche erzwungen werden. Durch diese Situation kann die hohe Temperatur zur Entzündung der umgebenden brennbaren Stoffe führen. Auch in baumwollebedeckten Schaumstoffmatratzen und Federn kann auf diese Weise eine Zündung erfolgen, wobei sich ein ganz gefährlicher Schmelbrand mit geringer Schmelgeschwindigkeit anschließen kann. Die in Brandräumen freigesetzten Schmel- oder Pyrolysegase führen rasch zu Todesfällen. Dies gilt insbesondere bei PUR-Schaummatratzen. Latex-Matratzen sind wegen der geringen Schmelgeschwindigkeit und der Latenz besonders gefährlich. Das Rauchverbot in Betten besteht daher aus präventiven Gründen zu Recht.

Reste von Tabakglut und Glut aus Feuerstätten dürfen nur in nicht brennbaren Behältern ohne brennbarem Inhalt entsorgt werden. Es besteht nämlich immer die Gefahr des unbemerkten Nachglimmens in der Asche und eines Folgebrandes. Speziell die Glut- und Aschereste aus Feuerstätten oder Kohlegrillgeräten besitzen ein hohes Gefährdungspotential auch noch nach einem oder mehreren Tagen, wie bereits angeführt. Dabei wird häufig auf eine angeblich genaue visuelle Überprüfung auf Glutteile in der entsorgten Asche verwiesen, die aber durch die Asche sehr erschwert ist und häufig unvollständig bleiben muss. Ist auch der Behälter brennbar, kann der Innenbrand zu einer Perforation der Wandung führen und sogar den Behälter erfassen. Bei dieser Gefährdungssituation ist Flutung mit Wasser oder eine Entsorgung ausschließlich in dichten, nicht brennbaren Behältern erforderlich. Letztere Maßnahme ist in Gaststätten generell gefordert.

In gleicher Weise sind offene Feuer wie Lagerfeuer oder das Verbrennen von Zweigen in Haufen gefährlich, wenn sie im Inneren Glutreste enthalten, die durch Wind auch nach langer Latenzzeit angefacht werden oder durch Funkenflug in die Umgebung verlagert werden. Die in Verordnungen geforderten Sicherheitsabstände zu brennbaren Stoffen, z. B. zu Wäldern, Getreidefeldern, Holzlagerplätzen u. ä. sind daher folgerichtig. Auf die Gefahr der Brandausweitung durch Brände in der Vegetation, vor allem im Frühjahr, ist hinzuweisen (siehe Punkt 4.1.4).

4.3 Zündung durch physikalische Prozesse

4.3.1 Reibung, Druck

Werden zwei Körper aufeinander verschoben, so wirkt mindestens die Normalkraft (Gewichtskraft) und übt Druck auf die Körper aus. Werden die Körper unter Kraftaufwendung gegeneinander verschoben, so kommt der durch diese Kraft bewirkte Normaldruck hinzu. Wegen der Rauigkeit der Oberflächen erfolgt die Relativbewegung nicht verlustfrei, sondern unter Reibungsverlusten. Unter Rauigkeit versteht man nicht nur die fühlbare makroskopische Struktur einer Oberfläche, sondern insbesondere auch die mikroskopische Rauigkeit bis in den Molekularbereich. Diese verlustbehaftete Relativbewegung zweier Körper macht sich durch Wärmeentwicklung in den Reibflächen bemerkbar, die man als Reibungswärme bezeichnet. Bewegungsenergie wird also in Wärmeenergie

verwandelt. Nach den gleichen Grundsätzen entstehen Ladungstrennungen bei nichtleitenden Materialien (siehe Punkt 4.3.5).

Ein triviales Beispiel für die Entstehung von Reibungswärme ist das Aneinanderreiben der Handflächen bei Kälte, um in den Handflächen ein Wärmegefühl zu erzeugen. Im technischen Bereich wird dagegen angestrebt, Reibungsverluste möglichst weitgehend zu vermeiden. Eine Minimierung der Reibungsverluste ermöglicht nämlich eine Erhöhung des Wirkungsgrades von Maschinen (Lager, Motoren, Antriebe u. a.), eine Verbesserung der Betriebssicherheit, eine Energieeinsparung und eine Ressourcenschonung.

Deshalb werden spezifische Schmiermittel eingesetzt, welche gemäß den Erkenntnissen der Tribologie (Lehre der Reibung, des Verschleißes und der Schmierung) ständig optimiert werden. Im Versagensfall, also bei Ausfall der Schmierung (Lubrikation), kommt es rasch zu erheblichen Reibungsverlusten, d.h. zu einem unerwünschten, sogar gefährlichen Wärmeumsatz, der nicht nur den Wirkungsgrad reduziert, sondern die Schmierung sukzessive verschlechtert und schließlich z. B. Lager und Kugellager beschädigt und sie bis zum Glühen erhitzen kann. Entsprechende Spuren (Riefen, Anlauffarben) sind ein deutlicher Nachweis eines solchen Schmierungs mangels. Auch bei einem Schlupf von Transmissionen treten solche Überhitzungen auf, die zur Entzündung von Treibriemen, Transportbändern oder Keilriemen führen. Mit brennbarem Material umwickelte Wellen können im Spalt zwischen Rad und Lagerbock so verdichtet werden, dass sie sich entzünden (Beispiel Heuzopf, -kohle). Auch festsitzende Bremsen können die Bremsanlage bzw. die Bremsscheiben in einem Glühzustand überführen und letztlich einen Schmiermittel- oder Reifenbrand verursachen.

Unsachgemäßes dauerhaftes Benutzen von Trenneinrichtungen, z. B. Schleifenlassen der Kfz-Kupplung zum Halten an einer Steigung bzw. im Stau, oder von Antrieben, kann zum Ausglühen und zur Zerstörung der Kupplung führen; es sind dabei sogar Zerstörungen der Schwungscheiben aufgetreten, die zur Zerstörung des umschließenden Gehäuses und zur Perforation von Kraftstoffleitungen mit Brandfolge geführt haben.

Ladeflächen von Fahrzeugen können durch Überladung so absinken, dass sie in Streifenkontakt mit den Reifen oder Rädern kommen. Auch unfallbedingt verformte Karosserieteile lassen eine solche Schädigung zu. Am Boden durchdrehende Reifen von festsitzenden Fahrzeugen (z. B. tiefer, trockener Sand) können durch Reibungswärme in einen brandgefährlichen Zustand überführt werden.

Alle aneinander reibenden Teile von Maschinen oder Geräteteilen können sich bei relativ hoher Relativgeschwindigkeit gefährlich erwärmen, weil der Grad der Erwärmung nicht nur vom Kontaktdruck und dem Reibungskoeffizienten der Kontaktpartner, sondern auch von der Trenngeschwindigkeit abhängt. Das bedeutet, dass geringe Relativgeschwindigkeiten im Allgemeinen zu mäßiger Erwärmung der Kontaktflächen führen, weil durch Wärmeableitung die Temperatur in der Kontaktfläche abgesenkt wird. Hohe Geschwindigkeiten führen daher zu einer Akkumulation der Wärme und damit zu einer hohen Kontakttemperatur. Für die Beurteilung der Gefahr sind daher immer die genannten drei Einflussgrößen zu beachten.

In der Kontaktfläche von Reibungspartnern können einige Hundert Grad erreicht werden. Im Fall des Trennschleifens (s. u.) werden sogar Schmelztemperaturen im zu bearbeitenden Werkstoff erzielt.

Bei Ausübung hoher Drucke auf die Reibungspartner kann es zu einem Materialabtrag kommen, ohne dass dies zwingend zu erheblichen Temperaturerhöhungen führen muss. Andererseits kann eine innige Materialverbindung durch Reibschweißen erzeugt werden.

Reibungsschäden kündigen sich häufig durch Geräusche und auffällige Gerüche an. Mit Hilfe eines Stethoskops, das kann hilfsweise sogar nur ein Schraubendreher sein, kann man Frühschäden unschwer hörbar machen. Reibungsschäden lassen sich durch Schleifspuren, Verformungen, Materialabtrag, Materialübertragung, Materialverfrachtung, Riefen, verkohlte Schmiermittel und durch farbig erscheinende Oxidschichten auf Oberflächen (Anlauffarben siehe Punkt 2.6.2.6.2) oder durch Schmelzerscheinungen am Basismaterial oder durch erschmolzene Partikel nachweisen.

Bei der Zerspanung von leichtentzündlichen Stoffen wie Magnesium (Mg) ohne Kühlmittel erfolgt eine Erwärmung der abgetragenen Späne und ein deutlicher Temperaturanstieg im Werkstück selbst. Beides führt zu einer erhöhten Brandgefahr. So können Magnesiumlegierungen bei der Trockenbearbeitung bzw. unzureichender Kühlung durch Temperaturerhöhung der Späne und der Werkstücke leicht brennen, da Magnesium bezogen auf andere Metalle eine niedrige Zündtemperatur hat. Magnesiumpulver z. B. besitzt eine Zündtemperatur von 500 °C, die nahe am Schmelzpunkt des Erdalkalimetalls Mg von 650 °C liegt.

Werden brennbare Gase oder Dämpfe in Mischung mit Sauerstoff verdichtet, können sie sich so erwärmen, dass sich diese entzünden. Eine Nutzanwendung stellt der Dieselmotor dar, der durch Kompression des Dieselkraftstoff-Luft-Gemisches eine Zündung des Gemisches herbeiführt, weshalb er auch Selbstzünder genannt wird. Die mechanische Energie zur Verdichtung wird teilweise in Wärme umgesetzt, die als Kompressionswärme bezeichnet wird. Dadurch können sich Druckgasbehälter in einem Maße erwärmen, dass sie selbst eine Zündung auslösen können bzw. diese begünstigen. Auch Druckstöße in gasgefüllten Rohrleitungen können zu gefährlichen Temperaturerhöhungen führen. Bei hochverdichteten und damit erwärmten Gasen und Dämpfen in Industrieanlagen kann ein Spontanaustritt zu einer Entzündung an der Umgebungsluft führen. Als einfache technische Einrichtung ist hier das Kompressionsfeuerzeug zu erwähnen.

4.3.2 Stoffliche Funken

Funken sind nicht nur Lichterscheinungen, sondern Festkörper, die so hoch erhitzt sind, dass sie elektromagnetische Strahlung im sichtbaren Bereich emittieren. Sie entstehen bei Verbrennungsvorgängen, beim Erzeugen und Bearbeiten von Metall und beim Schweißen. Da jede Temperatur durch ein elektromagnetisches Spektrum beschrieben wird (Wien'sches Verschiebungsgesetz, Stefan-Boltzmann-Gesetz), ist ein Funken visuell erfassbar, wenn die emittierte Wellenlänge im Sichtbarkeitsbereich des menschlichen Auges liegt (400 nm bis 700 nm).

Funken können aber auch Temperaturen aufweisen, die keine visuelle Wahrnehmung zulassen, weil deren Temperatur unter die Wahrnehmbarkeitsschwelle von etwa 600 °C abgesunken ist und das emittierte Spektrum sich in den nicht mehr sichtbaren infraroten Bereich verschoben hat; solche Funken sind aber immer noch zündfähig, weil sie immer noch die zur Zündung von brennbaren Materialien erforderliche Mindestzündenergie aufweisen können. Insofern sind Angaben bei Bränden, man habe den – sichtbaren – Funkenflug unter Kontrolle gehabt, wertlos, weil eben die Zündfähigkeit von erhitzten, nicht sichtbaren Partikeln fortbesteht. Erst wenn die stofflichen Funken bis unter die Zündtemperatur des kontaktierten Materials abgekühlt sind, was weit unter der visuellen Wahrnehmbarkeitsschwelle liegt, geht von ihnen keine Brandgefahr mehr aus.

Bei besonders inniger Reibung von Gegenständen unter hohem Kontaktdruck kann nicht nur die oben beschriebene Erwärmung der Kontaktpartner (Reibungswärme siehe Punkt 4.3.1) auftreten, sondern auch ein Materialabtrag in Form von Funken entstehen, d.h. durch den Reibungsvorgang werden heiße, möglicherweise sogar sichtbar glühende Partikel abgetrennt und in die Umgebung verbracht, wo sie brandzündend wirken können.

Stoffliche Funken sind also nicht nur als Lichterscheinung wahrnehmbar, sondern wirken auch als erhitzte Festkörper, in denen erhebliche Energie transportiert wird. Diese ist geeignet, auch brennbare Gase und Dämpfe zu entzünden und die immanente Energie an andere brennbare Materialien zündend zu übertragen. Funken enthalten einen hohen Energiebetrag bis zu 1 mJ. Die Mindestzündenergien von Gasen liegen deutlich unter diesem Wert, weshalb in ex-gefährdeten Räumen Funkenflug unter allen Umständen verhindert werden muss.

Eine spezielle Form von Funken stellen die Schlagfunken dar; sie entstehen, wenn feste Materialpartikel durch lokale mechanische Beanspruchung aus dem Verbund herausgeschlagen werden. Ihr Energieinhalt ist geringer als die durch Reibung verursachten Funken, weshalb die Brandgefahr geringer ist, jedoch eine explosible Atmosphäre immer noch gezündet werden kann (siehe Punkt 4.7).

Bei Verkehrsunfällen können durch den innigen Kontakt der Fahrzeuge sowohl Reib- als auch Schlagfunken entstehen, wobei brennbare Betriebsflüssigkeiten entzündet werden können. Die Crashbrände von Fahrzeugen (siehe Punkt 4.3.7) sind auf eine solche Zündung zurückzuführen, können natürlich auch durch unfallbedingte Fehlerströme, allerdings mit längerer Entwicklungszeit, gezündet werden.

In explosionsgefährdeten Bereichen (Ex-Bereiche) müssen Werkzeuge aus nicht funkenreißendem Material verwendet werden, wie z. B. aus Kupfer-Beryllium oder Spezialbronze. Für das Arbeiten dürfen nur dafür zugelassene bzw. geeignete Prüf- und Messmittel mit Zertifizierung verwendet werden.

Beim Trennschleifen (ugs. „Flexen“) kann das zu trennende Material im Trennschleifbereich bis zur Verflüssigung erhitzt und verflüssigtes Material aus dem Trennschleifbereich ausgeworfen werden.

Im Flug kann eine Oxidationsreaktion zu einer erheblichen Nachverbrennung führen, was zu einer Temperaturerhöhung und der damit verfügbaren Zündenergie führt. Der Gefährdungsbereich erstreckt sich in der Horizontalen bis über 10 Meter und in Fallrichtung bis etwa -20 m. Der Gefährdungsbereich ist in nachfolgender Skizze dargestellt.

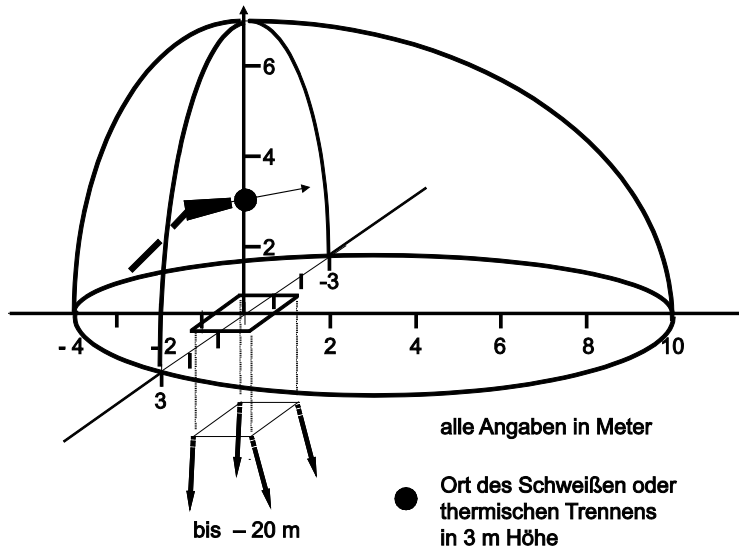


Abb. 9: Gefährdungsbereich beim Trennschleifen oder Schweißen

Auch beim elektrischen und autogenen Schweißen und beim autogenen Trennschneiden wird verflüssigtes Basismaterial und Schlacke beschleunigt in die Umgebung verteilt. Es besteht in der Umgebung gegenüber dem Trennschleifen eine deutlich erhöhte Brandgefahr, weil die weggeschleuderten Partikel wegen ihrer Größe trotz nahezu gleicher Temperatur wie die der Trennschleiffunken einen wesentlichen höheren Energieinhalt aufweisen.

Die anfangs flüssigen Metall- oder Schlackenteile nehmen eine Minimaloberfläche ein und sind als kugelförmige Perlen geringer Durchmesser (μm -Bereich) zu erkennen, die man als Schmelzperlen bezeichnet. Zwei typische Beispiele solcher Schmelzperlen sind in der rasterelektronenmikroskopischen Darstellung (siehe Abb. 10) abgebildet. Gelegentlich findet man sogar Hohlkörper-Schmelzperlen.

Die Sicherheitsmaßnahmen bei Schweiß- und Schneidarbeiten entsprechen mindestens jenen beim Trennschleifen.

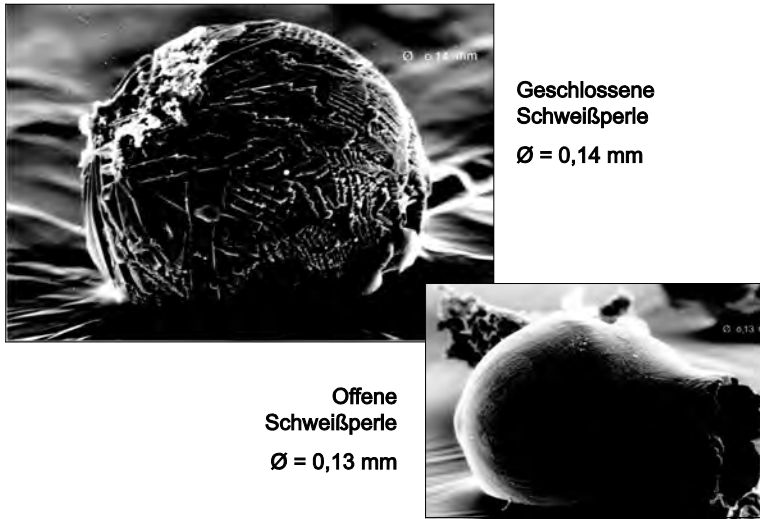


Abb. 10: Rasterelektronenmikroskopische Darstellung von Schweißperlen

In Abgasanlagen wie von Verbrennungsmotoren kann sich Ruß akkumulieren. Er kann nachverbrennen und auch als glühende Partikel ausgeworfen werden. Werden Verbrennungsmotoren in brennbarer Umgebung betrieben, wie z. B. Traktoren in landwirtschaftlichen Tennen, oder Notstromaggregate in leichtentzündlicher Umgebung, so ist besondere Aufmerksamkeit aufzuwenden.

Bei pyrotechnischen Gegenständen sind Effektfunken gewollt. Sie sollten vollständig verbrennen und keine Brandgefahr begründen. Wird aber der pyrotechnische Gegenstand fixiert, so wird ein wesentlicher Teil der Verbrennungsenergie dem Fixierungsgegenstand übertragen. Kommt es durch längeres Nachglühen von abgefallenen Teilen der pyrotechnischen Komponenten zum Kontakt mit brennbarem Material, so ist eine Brandzündung durch die Funkengarbe und die Restfunken möglich, obwohl ein Nachglimmen der pyrotechnischen Gegenstände bestimmungsgemäß ausgeschlossen sein sollte.

Feuerstätten (siehe Punkt 4.3.3) sind so zu konstruieren, dass ein Funkenauswurf nicht brandgefährlich wird. Auch vor offenen Kaminen und Kaminrevisionsöffnungen sind nicht brennbare Böden oder entsprechend große unbrennbare Bodenbeläge anzubringen. Türen von Feuerstätten sind so zu verschließen, dass ein Funkenauswurf nicht erfolgt. Bei offenen Kaminen ist ein Funkengitter oder -vorhang empfehlenswert.

Um das Eindringen von Funken in die Dachdeckung und damit in den Dachraum zu verhindern, sind Dachabdichtungen nach DIN 4102 Teil 7 gegen Flugfeuereinwirkung sicher zu gestalten.

4.3.3 Feuerstätten

In Feuerstätten wird bestimmungsgemäß ein Feuer unterhalten. Sie sind unter Berücksichtigung der Feuerraum-Temperatur dauerhaft so zu gestalten, dass durch den Abbrand des Heizgutes keine Brandgefahr in der unmittelbaren Umgebung entsteht. Durch Strahlung, Wärmeleitung, Konvektion und Funkenflug kann dieses verwahrte Feuer auch auf die Umgebung übergreifen. Dabei geht die Brandgefahr nicht nur vom Feuerungsraum, sondern auch von den Abgas- und Rauchführungen aus, die zwangsläufig erhöhte Temperaturen aufweisen. Es sind deshalb eine Vielzahl von technischen Errichtungsbestimmungen erlassen worden, um die Gefahren zu reduzieren. Diese beschreiben Sicherheitsabstände, Schutzrohre und thermische Isolierungen. Hier wird z. B. auf die Muster-FeuV oder FeuV der Länder verwiesen.

Feuerräume sind immer feuerfest zu ummanteln. Das Erfordernis der Feuerfestigkeit betrifft insbesondere die Umschließung des Feuerungsraumes, in dem je nach Brenntemperatur des Brennstoffes und nach der Art der Zuführung der Verbrennungsluft durchaus extreme Temperaturen erreicht werden. Diese sind qualitativ an der Farbe der Glut zu erkennen, weil schon bei relativ niedrigen Temperaturen eine Rotglut wahrnehmbar ist, die mit zunehmender Temperatur eine Gelb- und schließlich eine Weißfärbung annimmt. Kohlenglut ist somit rot gefärbt, während sich ein mit Koks betriebenes, gebläsebetriebenes Schmiedefeuer gelblich-weiß darstellt.

So verwundert nicht, dass bei unangemessener Auslegung oder beim Teilversagen der inneren Auskleidung auch Anschmelzungen der Wandungen und insbesondere Rissbildungen auftreten. Unter ungünstigen Bedingungen, insbesondere bei schlechtem Schornsteinzug oder Zugumkehr, kann es hier zum Austritt von Funken oder gar Flammen und auch des toxischen Kohlenmonoxids kommen.

In Feuerstätten ist bei Verwendung von Metallen auch der Korrosion besondere Aufmerksamkeit zu widmen (siehe Punkt 4.3.8.1). Durch Kondenswasserbildung bei Taupunktunterschreitung und Einwirkung der Pyrolyseprodukte können sich aggressive Säuren bilden, die rasch zu Perforationen an metallischen Rohren führen.

Feuerstätten benötigen Öffnungen zur Zufuhr von Feststoffen und zur Entnahme der Asche. Erstere können versehentlich offen bleiben und letztere werden zur Regelung der Luftzufuhr teilgeöffnet betrieben, wobei der Öffnungsgrad manuell wie auch thermostatisch geregelt sein kann. Der Auswurf von glühenden Teilen, insbesondere in der Anheizphase oder bei kleinen Verpuffungen, stellt bei Fußböden aus brennbaren Baustoffen ein nicht unerhebliches Gefahrenpotential dar. In den Errichtungsbestimmungen wird daher vor der Feuerstätte ein relativ großflächiger Belag aus unbrennbarem Material gefordert (Blechplatte, Fliesen, Steinboden).

Die Entnahme der Asche erfolgt häufig manuell, wobei abfallende Glutteile und nicht völlig erkaltete Asche in Kontakt mit brennbarem brandgefährlich werden können. Ein Brand kann so durch glühende Ascheteile an andere Orte verlagert werden (siehe Punkt 4.2.3). Hier ist auf die Entsorgung von vermeintlich erkalteter Asche in Abfallbehälter mit brennbarem Inhalt oder in brennbare Behälter hinzuweisen, die mit erheblichem Zeitverzug zum Brand führen kann. Die nachfolgende Tabelle gibt exemplarisch einen Hinweis

auf die relative Häufigkeit von solchen Inbrandsetzungen nach der Ausbringung von Asche in brennbare Umgebung:

Tab.: Zündverzögerung nach Ausbringen nicht erkalteter Asche

Intervall vom Ausbringen der Asche bis zur Brandzündung in h	relative Anteile der Brände in %
< 24 h	62
24 – 48 h	30
48 – 72 h	8

Die Menge an Brennstoff ist der Feuerstätte anzupassen, um eine Überlastung des Brennraumes zu vermeiden. Die Gebrauchsanleitung gibt hierüber Auskunft; eine Einweisung ist immer erforderlich. Eine thermische Überlastung führt zu mechanischen Schäden des Brennraumes, d. h. zu Rissen, Verformungen und zur Übertragung der Brennenergie auf die dafür nicht ausgelegte Peripherie des Feuerungsraumes und der Abgasführung. Eine solche Überlastung erfolgt typisch bei Ölverdampfungsbrennern, wenn der Regler versagt oder wenn der Brennertopf durch Unvorsichtigkeit überfüllt wird. Sie kann auch bei automatischer Befüllung von Feuerungsräumen, z. B. bei gestörter Schneckenförderung von Feststoffen (Hackschnitzel, Sägespäne) auftreten. In diesen Anlagen ist auch bei fehlerhafter Trennklappe oder Zellenradschleuse ein Rückbrand in den Spänebehälter möglich.

Der Menge des Brennstoffes ist auch die Versorgung mit Verbrennungsluft anzupassen, um einerseits die maximal zulässige Temperatur des Feuerungsraumes nicht zu überschreiten und andererseits Verpuffungen als Folge von Schwelprozessen zu verhindern. Gerade bei Feuerungsräumen aus Stahl und entsprechenden Einbauten ist mit Schmelzschäden oder Verzunderung zu rechnen, welche zu gestörter Verbrennung und zu gefährlichen Betriebszuständen führen können.

Insbesondere bei ungenügender Zufuhr von Verbrennungsluft erfolgt eine unvollständige Verbrennung mit der Gefahr, dass sich auch Kohlenmonoxid (CO) in gefährlicher Konzentration bildet. Dieses kann einerseits zu Verpuffungsgefahren mit Schädigung der Feuerstätte führen, aber insbesondere bei Perforation der Feuerstätte zur Freisetzung des Kohlenmonoxids (CO) in die Umgebung. Es besteht eine extrem hohe Vergiftungsgefahr, wobei durch Ermüdung und Bewusstseinstörung eine Selbstrettung der betroffenen Personen, insbesondere zur Schlafenszeit, häufig ausgeschlossen ist; CO ist geruchlos und wirkt hochtoxisch. Der zu geringen Luftzufuhr ist die mangelhafte Ableitung der Pyrolyseprodukte gleich zu setzen, so dass die Dichtheit und dauerhafte Wirksamkeit der Abgaswege garantiert werden muss. Querschnittverringerungen oder Teilblockaden des Abgasweges sind daher unbedingt zu vermeiden.

Der Abgasweg umfasst die Rauchrohre, die Verbindungsstücke und den Schornstein (Kamin). Wirksam sind diese Einrichtungen nur, wenn sie dicht und ansteigend ausgeführt sind und der Schornstein eine entsprechende Höhe, eine ausreichende Überdachführung und eine freie Anströmung aufweist. Ziel muss sein, eine effektive Konvektion im Schornstein zu erzielen (Druckdifferenz), um die Folgeprodukte der Verbrennung (Ruß, Rauch, hochtoxisches Kohlenmonoxid) zuverlässig ins Freie abzuführen und um die Ansaugung von Frischluft für die Verbrennung sicherzustellen.

Ein erheblicher Baumangel liegt somit vor, wenn Schornsteinwangen geschwächt oder als Stützen missbraucht werden. Bei beschädigten Schornsteinwangen und zu geringem Schornsteinzug (Unterdruck) kann gerade in dem visuell nicht kontrollierbaren Bereich von Durchdringungen von Fehlböden eine besondere Brandgefahr herbeigeführt werden. Auch auf Setzrisse ist zu achten. Die Dichtheit kann neben der willentlichen Schwächung der Wandstärke eines Schornsteins auch durch Blitzeinwirkung, Erdbeben, Gefrierschäden oder Beschädigung des Mörtelverbundes beeinträchtigt werden.

Der Querschnitt des Schornsteins ist der Verbrennungsleistung der Feuerstätte angepasst auszuführen. So sind Reduzierungen des Querschnittes bei Umstellung von Festbrennstoff auf Öl oder Gas als Brennstoff durchzuführen. Nur so ist zu erwarten, dass die Funktionstüchtigkeit des Schornsteins nicht beeinträchtigt wird. Im Übrigen kann dadurch auch eine zu starke Abkühlung der Verbrennungsgase verhindert werden, die zur Versottung und zu starkem Rußniederschlag führen. Auch Funkenflug, der in der Nähe befindliche brennbare Objekte gefährden kann, wird durch einen funktionstüchtigen Schornstein unterbunden. Der Querschnitt von Schornsteinen kann auch durch meist unbeabsichtigte Baumängel reduziert werden. Tiere und Tiernester können ebenfalls zur Querschnittsreduzierung beitragen, wobei sie insofern besonders gefährlich sind, als sie bei den großen Überprüfungsintervallen über längere Zeiten verborgen bleiben können.

Die Aufgabe der Schornsteinfeger (Schornsteinkehrer, Kaminkehrer) besteht darin, die Sicherheit der Feuerstätte zu prüfen und zu überwachen. Dazu gehört auch die Reinigung des Schornsteins, d.h. die Beseitigung der Kondensate und des Rußes sowie von Fremdkörpern, um Schornsteinbrände (Glimm- und Flammbrände) zu verhindern, die ihrerseits sowohl mechanische Schäden verursachen als auch für das Gebäude brandgefährlich werden können. Gelegentlich werden Schornsteine zu Reinigungszwecken ausgebrannt; da diese Maßnahme selbst brandgefährlich ist, ist sie nach dem Schornsteinfegergesetz dem Fachmann (Bezirksschornsteinfegermeister) vorbehalten und muss von ihm durchgehend überwacht werden, bis sich nach Abschluss des Ausbrennens eine deutliche Abkühlung nachweisen lässt. Durch verkürzte Beobachtungszeiten kann sich nämlich ein Schornstein wegen der relativ geringen Wärmeleitung und der hohen Wärmekapazität unkontrolliert weiter erwärmen und gerade in Bereichen des Fehlbodens, wo eine Energiefortleitung erschwert ist, einen brandkritischen Zustand erzeugen.

Die baulichen Gegebenheiten verlangen manchmal eine Aufstellung von Feuerstätten in der Nähe brennbarer Einbauten oder eine Abgasführung durch Wände aus brennbarem Material (Holz und andere brennbare Materialien wie Wärmedämmungen). Wegen der hohen Feuerungs- und Abgastemperaturen besteht dabei grundsätzlich die Gefahr der so genannten Pyrophorisation von Holz (siehe Punkt 4.4.3) oder gar dessen Entzündung.

Um solche Brände zu verhindern, müssen alle Teile der Feuerstätte mit entsprechendem Sicherheitsabstand zu Brennbarem errichtet oder verlegt werden, damit an brennbaren Teilen keine brandgefährlichen Temperaturen entstehen. Die Muster-Feuerungsanlagenverordnung bzw. die Länder-Feuerungsverordnungen geben hierzu detailliert Auskunft. Ersatzweise ist eine thermische Isolierung mit Hinterlüftung oder die konvektive Abfuhr der Wärme sicherzustellen. Eine thermische Isolierung ohne Hinterlüftung führt grundsätzlich zu einem Wärmestau; so kann trotz aufwändiger Isolierung ein Brand in anliegenden brennbaren Gegenständen gezündet werden. Die Betrachtung der aufeinander folgenden Wärmewiderstände der einzelnen Schichten der thermischen Isolierung um die Abgasrohre und Schornsteine herum gibt Auskunft über das Temperaturprofil und die Brandgefahr. Durch Vernachlässigung dieser Grundprinzipien entstehen häufig brandgefährliche Zustände, die sich u. U. erst nach erheblicher Zeitverzögerung als brandrelevant herausstellen. Im Zweifelsfall ist der Bezirksschornsteinfeger oder ein anderer Fachmann zu Rate zu ziehen.

In der Praxis werden in Holz-Fertighäusern nachträglich Feuerstätten, wie Kachelöfen oder offene Kamine, eingebaut. Dabei kann übersehen werden, dass sich hinter verputzten Wänden oder Leichtbauwänden Holzkonstruktionen verbergen, die nach thermischer Aufbereitung mit erheblicher Zeitverzögerung in Brand geraten können. Auch hier besteht die Möglichkeit einer über lange Beanspruchungszeit herbeigeführten Pyrophorisation (siehe Punkt 4.4.3). Mangelhafte Ausführungen von Edelstahlschornsteinen bzw. -kaminen insbesondere im Bereich der Dachdurchführung fallen als neue Brandursache auf, wenn die Hinterlüftung außer Acht bleibt oder diese unsachgemäß ausgeführt ist.

In allen Fällen, wo Heißgase in der Nähe von Brennbarem geführt sind, ist eine sorgfältige Planung erforderlich oder eine Temperaturmessung am brennbaren Bauteil durchzuführen, um eine Brandgefahr auszuschließen ($T < 85 \text{ °C}$). Die Planung umfasst die Ermittlung der Wärmewiderstände aller Schichten zwischen Heißgas und Brennbarem und die Berechnung des Temperaturprofils.

Soweit Feuerstätten thermostatisch geregelt werden, ist auf die Versagensmöglichkeit der Fühler (Thermoelemente, Thermowiderstände) oder der Regelung selbst zu achten. Den technischen Sicherheitsanforderungen entspricht, dass neben dem Regelthermostaten eine Übertemperaturschutzeinrichtung (Sicherheitstemperaturbegrenzer, STB) diese Betriebsstörung sicherheitstechnisch beherrscht. Eine vorsätzliche Benutzung des Sicherheitstemperaturbegrenzers zur Steuerung der maximalen Temperatur widerspricht der Sicherheitsphilosophie und ist nicht nur unzulässig, sondern auch gefährlich; auf die angemessene Einstellung des entsprechenden Schaltniveaus ist zu achten. Bei der Anbringung dieser Temperaturfühler ist das Temperaturprofil des zu überwachenden Raumes zu berücksichtigen, damit der Fühler an der temperaturkritischsten Stelle angebracht wird und daher rechtzeitig vor Erreichen des Gefahrenzustandes reagiert werden kann.

4.3.4 Heiße und glühende Flächen und Gegenstände

Heiße und glühende Flächen und Gegenstände können in direktem Kontakt mit brennbarem Material stehen und so Wärmeenergie unmittelbar übertragen. Auch indirekt erhitze Flächen und Gegenstände können brandgefährlich erwärmt werden.

Bei direktem Kontakt erhitzter Gegenstände mit Brennbarem erfolgt an der Grenzfläche so lange ein Wärmeübergang, bis sich die Temperaturen der Kontaktpartner an der Kontaktfläche angeglichen haben. Die Temperatur des heißen oder glühenden Gegenstandes wird zumindest im oberflächennahen Bereich abgesenkt und der kalte Gegenstand wird erwärmt. Der Wärmeübergang erfolgt beim direkten Kontakt vor allem durch Wärmeleitung, aber allgemein auch indirekt durch Konvektion und Wärmestrahlung. Bei einem Temperatursausgleich zwischen heißen und kälteren Gegenständen kann die Starttemperatur des heißeren Partners nie erreicht werden, auch wenn ein langandauernder Wärmeaustausch erfolgt. Die gelegentlich anzutreffende Meinung, man könne durch besonders langandauernden Wärmeübergang eine höhere Temperatur als die des heißeren Gegenstandes erreichen, ist physikalisch falsch.

Heiße Flächen strahlen auch über größere Distanzen Wärmeenergie nach dem Stefan-Boltzmann-Gesetz in die Umgebung ab, wie schon bei der Abhandlung über die Flammenstrahlung (siehe Punkt 1.3.1) dargelegt. Die Konvektion oder der Wind beeinflussen den Wärmeübergang durch elektromagnetische Strahlung nicht; sie können jedoch am bestrahlten Gegenstand durch Wärmeübergang auf die kältere Luft zur Reduzierung der Oberflächentemperatur beitragen.

Da die strahlende Fläche 2 auch Strahlung der Leistung $\Phi_2 = \sigma A T_2^4$ von der Umgebung mitgeteilt bekommt, ist das Stefan-Boltzmann-Gesetz bei gleichen Flächen A und gleichen Emissionsgraden ε wie folgt anzuwenden

$$\Phi_{\text{ges}} = \sigma \varepsilon A (T_1^4 - T_2^4)$$

Es ist unschwer zu erkennen, dass nur bei größeren Temperaturunterschieden eine merkliche Abstrahlungsleistung erfolgt. Von Bedeutung sind in der Praxis Oberflächentemperaturen von etwa $\vartheta > 600 \text{ °C}$ (873 K), weil erst bei diesen Temperaturen kritische spezifische Strahlungs- bzw. Zündleistungen erreicht werden. Im Zweifelsfall sind unter Verwendung der spezifischen Falldaten entsprechende Berechnungen nach dem Strahlungsgesetz vorzunehmen (s. o.), wobei die Geometriebedingungen einen erheblichen Einfluss ausüben. Wertvolle Details können dem VDI-Wärmeatlas entnommen werden.

Auch die Sonne kann als heiße Oberfläche aufgefasst werden. Aus dem Maximum des elektromagnetischen Spektrums im grünen Spektralbereich kann man die Temperatur der Sonne nach

$$T = 2,898 \cdot 10^{-3} \lambda^{-1} = 2,898 \cdot 10^{-3} 520 \text{ nm} = 5573 \text{ K}$$

errechnen, wobei wegen des großen Abstandes zur Erde dort in unseren Breiten lediglich eine spezifische Strahlungsleistung von $0,1367 \text{ W cm}^{-2}$ eingestrahlt wird (siehe Punkt 4.1.1).

Das Strahlungsgesetz soll an einem praktischen Beispiel demonstriert werden. Eine schwarze Heizplatte mit einer Leistungsaufnahme von $\Phi = 1000$ Watt und einem Radius von $r = 0,15$ m erreicht – vereinfacht als Schwarzer Strahler ($\varepsilon = 1$) aufgefasst – nach dem Strahlungsgesetz eine Temperatur T von

$$T = (\Phi \sigma^{-1} \pi^{-1} r^2)^{1/4} = 707 \text{ K} = 434 \text{ °C}$$

welche erfahrungsgemäß noch nicht besonders kritisch ist.

In der Gesamtleistung sind alle in der Strahlung enthaltenen Wellenlängenanteile, also das gesamte abgestrahlte elektromagnetische Spektrum enthalten. Die Leistung in einem Wellenlängenbereich $d\lambda$ wird nach dem Strahlungsgesetz von Planck berechnet. Das Stefan-Boltzmann-Gesetz ergibt sich, wenn die abgestrahlte Leistung über alle Wellenlängen integriert wird (Integration über Planck'scher Strahlungskurve).

Dieses als T^4 -Gesetz bezeichnete Verhalten von heißen Oberflächen hat erhebliche Konsequenzen für die Brandgefährdung der unmittelbaren als auch der entfernteren Umgebung, wie in Abschnitt 1.3.1 exemplarisch dargestellt. Im Fall eines kurzzeitigen Kontakts tritt ein Zünderfolg am brennbaren Gegenstand ein, wenn die Zündtemperatur des anliegenden brennbaren Materials (AIT) erreicht ist und die Mindestzündenergie übertragen wird. Speziell bei Holz ist die Kontaktzeit zu beachten; je länger diese ist, desto niedriger ist die erforderliche Oberflächentemperatur, um einen Zünderfolg herbeizuführen.

In diesem Zusammenhang ist auf die so genannte Pyrophorisierung des Holzes hinzuweisen, die dieses Verhalten deutlich beschreibt. Sie wird in einem separaten Abschnitt als Sonderfall behandelt (siehe Punkt 4.4.3).

Bei Ab- und Anlagerung von Stäuben an heißen Flächen ist die von der Einwirkungsdauer abhängige Glimmtemperatur entscheidend, die niedriger als die Zündtemperatur des brennbaren Materials liegt und die mit zunehmender Schichtdicke abnimmt. Die Ablagerungen können bei kalten Flächen über lange Zeit unbeachtet bleiben, beim Aufheizen erfolgt aber dann eine Annäherung an die Glimmtemperatur. Bei der Gefahr einer Pyrophorisierung (siehe Punkt 4.4.2) ist das Absinken auch der Glimmtemperatur zu berücksichtigen.

Staubablagerungen auf Rohren, in denen heiße Medien transportiert werden, sind daher bei mangelnder Säuberung brandgefährlich. Dicke Staubschichten auf heißen Oberflächen stellen ein Sicherheitsrisiko dar, das mit zunehmender zeitlicher Belastung erhöht wird. Bereits Dampfleitungen, in denen Wasserdampf unter hohem Druck geleitet werden, sind also geeignet brennbare Stäube und Holz bei längerdauernder Einwirkung zu entzünden. In Industrieanlagen können Staubablagerungen auf Bündeln von elektrischen Leitungen die Wärmeabfuhr so behindern, dass die Leitertemperatur so hoch wird, dass Schäden an der Isolierung und als Folge ein Brand gezündet werden kann.

Beim Auftreffen von Flüssigkeiten auf heiße Flächen kann die zwischen Oberfläche und Flüssigphase sich bildende Dampfschicht eine Schutzwirkung in dem Sinne aufweisen, als der Wärmeübergang behindert wird und so die Flüssigphase den Siedepunkt nicht

oder nur zeitverzögert erreicht. So erfolgt beim Benetzen von heißen Flächen mit brennbaren Flüssigkeiten trotz der über der Zündtemperatur liegenden Temperatur der Oberfläche nicht zwingend eine Entzündung. Dies lässt sich bei erhitzten Herdplatten verifizieren. Dieser Effekt ist als Leidenfrost-Phänomen bekannt. Besondere Oberflächengeometrien (Topographie) oder Korrosionsflächen können aber zur Zerstörung dieses Sicherheitseffekts und zum spontanen Wärmeübergang führen, was bei Kfz-Bränden zu beachten ist.

Alle Wärmegeräte, auf die später noch einzugehen ist, besitzen bestimmungsgemäß heiße Flächen und liefern Nutzwärme, aber auch Verlustwärme; die Wirkungsgrade der Wärmegeräte sind sehr unterschiedlich. Als Sonderfall ist die herkömmliche Glühlampe zu betrachten, die mindestens 90 % der Leistungsaufnahme in Wärme und nur etwa 10 % in sichtbares Licht umsetzt. Im Fall der Verdämmung ist sie also als Wärmegerät mit heißen Oberflächen aufzufassen. Es ist deshalb ein Trend zu Energiesparlampen (Gasentladungslampe), aber besonders zu LED-Lampen festzustellen, deren Verlustleistung relativ gering ist.

Die Planck'sche Strahlungskurve der Glühlampe überstreicht nämlich überwiegend den infraroten Bereich. Die Wendeltemperatur beträgt je nach Lampentyp 1.800 °C bis 3.000 °C. Die erhebliche Verlustwärme wird in die Umgebung abgestrahlt und erwärmt so den Glaskolben infolge Absorption je nach Messort bis zu 250 °C bei einer Leistungsaufnahme von 100 Watt. Im Fall der Annäherung von Brennbarem, d.h. schon bei geringer Teilverdämmung wird die notwendige Konvektion so behindert, dass die Temperatur des Glaskolbens und der Verdämmung gefährlich erhöht wird. Es ist deshalb nicht überraschend, dass bereits Lampen mit einer Leistungsaufnahme von 40 Watt bei Totalverdämmung (Sicherheitsabstand = 0) brandgefährlich werden. Es ist deshalb ein Sicherheitsabstand zum Glaskolben der Glühlampe einzuhalten und die natürliche konvektive Kühlung des Glaskolbens stets sicherzustellen.

Als Verdämmung kommen auf Leuchten abgelegte Papiere oder textile Gegenstände in Betracht. Will man besondere Lichteffekte erzielen, indem man Leuchten modifiziert, ist immer besondere Vorsicht geboten. Zu kleine Lampenschirme können durch Wärmestau in Brand geraten, weshalb immer ein Abstand zum Leuchtmittel einzuhalten ist, um die Konvektion nicht zu behindern. Auch vorübergehendes Abdunkeln von Leuchten durch Auflegen von textilem Material ist sehr bedenklich. Der Einbau von Leuchten in Möbel kann zu Verdämmungswirkungen führen, weshalb hierfür nur geeignete Leuchten eingebaut werden dürfen.

Bei Halogenlampen, deren Wendeltemperatur höher liegt als bei üblichen Glühlampen, vergrößert sich die Gefahr deshalb, weil auch der kleinvolumige Quarzglaskolben im Betriebszustand glühend wird; im Fall der Zerstörung des unter erheblichem Binnendruck stehenden Glaskolbens können die in die Umgebung verstreuten Fragmente allein brandzündend wirken. Diese Gefahr besteht insbesondere bei den Hochvolt-Halogenlampen am Ende ihrer Lebensdauer.

Niederspannungshalogenleuchten werden meist mit 12 Volt betrieben und können daher sogar mit isolierten, offen verlegten Kupferleitungen oder sogar nicht isolierten Leitungen betrieben werden. Die Brandgefahr besteht nicht nur durch Verdämmung infolge fal-

schen Einbaus, sondern durch Überlastung der Leitungen, die dadurch Übertemperaturen annehmen. Den Leuchten sind entsprechende Leitungsquerschnitte zuzuordnen. Auch die Anschlussklemmen müssen bestimmte Eigenschaften aufweisen. Auf die konsequente Trennung der Niederspannungsleitungen ist zu achten. Der Niederspannungstransformator darf nicht durch eine zu hohe Zahl von Lampen und durch Verdämmung überlastet werden.

Niederdruckentladungslampen oder Leuchtstofflampen (ugs. Neonlampen, falscher Begriff!) weisen dagegen eine sehr niedrige Betriebstemperatur auf, die sie ungefährlich machen; die Brandgefahr besteht eher im Versagen der zum Betrieb nötigen elektrischen Betriebsmittel (Vorheizung, Starter, Drosselspule, Kondensator). Drosselspulen können eine Verlustleistung von bis zu 25 % der Nennleistung der Lampe aufweisen. Im Fehlerfall, z. B. Flackern der Entladungslampe oder Windungsschluss, erhitzt sich die Drossel auf einige Hundert Grad Celsius und stellt dabei bei Montage auf brennbarem eine hohe Brandgefahr dar. Leuchtstofflampen-Leuchten dürfen nicht direkt auf brennbare Unterlage montiert werden. Elektronische Vorschaltgeräte weisen dagegen nur 10 % Verlustleistung auf.

Auch die zur Kompensation verwendeten Kondensatoren können altern und aufplatzen und in Brand geraten. Gefördert wird diese Schädigung auch durch benachbarte überhitzte Drosselspulen. Entsprechend müssen die Kondensatoren mit dem Dreieckssymbol F bzw. FP (DIN EN 60598-1), oder neuerdings mit A und B gekennzeichnet sein. Die B-Variante besitzt eine Abschaltvorrichtung.

F-gekennzeichnete Leuchten dürfen auf Materialien, die schwer oder normal entflammbar (DIN 4102: B1 oder B2) sind, ohne Luftabstand montiert werden. Im Fall des Anbaus an brennbaren Einrichtungsgegenständen ist das nur möglich, wenn die Zündtemperatur dieser Materialien $>200\text{ °C}$ ist. Ist die Zündtemperatur nicht bekannt oder $\leq 200\text{ °C}$, ist ein Luftabstand von $\geq 35\text{ mm}$ einzuhalten. Fehlt das Zeichen F, sind ein Abstand von 35 mm einzuhalten, die Leuchte zur Befestigungsfläche geschlossen auszuführen oder ersatzweise mit einem Blech abzudecken.

Für die Leuchten sind viele Aufschriften und Bildzeichen vorgeschrieben, um die Betriebssicherheit zu gewährleisten. Sie sind umfangreich in der schon erwähnten Norm DIN EN 60598-1 dargestellt und erläutert.

Leuchten dürfen nur bei einer Umgebungstemperatur von 25 °C verwendet werden, es sei denn, sie sind mit einer Temperaturbezeichnung $t_a \dots\text{°C}$ versehen. Die Temperatur der thermisch von Leuchten belasteten Flächen darf 90 °C nicht überschreiten. Leuchten müssen Angaben über die Leistungsaufnahme der Leuchtmittel aufweisen, um die Fassung und den Leuchtenkorpus selbst zu schützen. Dagegen wird aber häufig durch Einsatz von Lampen mit höherer Leistungsaufnahme absichtlich verstoßen, weil eine höhere Lichtausbeute erwünscht wird und die leistungsbegrenzte Leuchte nicht ausgetauscht wird. Auffällig sind daher beispielsweise die Schäden an den so genannten Ovalleuchten. In die Leuchten dürfen Kopfspiegellampen nur eingesetzt werden, wenn das entsprechende Symbol (Kopfspiegellampe) aufgebracht ist; durch Rückstrahlung können schädliche Temperaturen an allen Teilen der Leuchte entstehen.

Leuchten mit dem Symbol FF oder D im Dreieck besitzen eine begrenzte Oberflächentemperatur, so dass sie im Fehlerfall keine Stäube und Fasern entzünden können. Die äußeren Flächen dürfen unter keinen Umständen eine Temperatur über 115 °C annehmen. Die Leuchten sind mit einer Wanne auszustatten. Die vom Hersteller angegebene Montageart ist immer zu berücksichtigen.

Leuchten mit dem Symbol M im Dreieck betreffen Leuchten (so genannte Möbelleuchten), die wegen der begrenzten Temperaturen auf Gegenständen der Baustoffklassen A, B1 und B2 (DIN 4102) nach den Montagevorgaben eingebaut werden dürfen. Sind die Leuchten mit dem Symbol MM in Dreiecken versehen, dürfen sie auch auf Materialien mit unbekanntem Entflammungsverhalten montiert werden, wenn die Vorgaben des Herstellers bezüglich des Einbaus eingehalten sind. Fehlen diese Kennzeichnungen, dürfen die Leuchten in Möbeln nicht betrieben werden.

Nur wenn Vorschaltgeräte, die außerhalb der Leuchten montiert werden, das Kreissymbol mit A-ähnlichem Piktogramm tragen, dürfen sie auch auf brennbarer Unterlage (DIN 4102-B1 und -B2) montiert werden. Auf brennbaren Einrichtungsgegenständen (Gardinenleisten, Regale, Schrankwände) bedarf es aber eines Sicherheitsabstandes von 35 mm. Leicht entflammbares Material (Staub, Faserstoffe, Papier, Baumwolle) ist von den Vorschaltgeräten fernzuhalten.

Scheinwerfer und Strahlerleuchten zum Bestrahlen von Schaufenstern, Freiflächen, Lagern oder Objekten sind häufig mit Leuchtmitteln (Brenner) hoher Leistung ausgestattet. Sie werden zur effektiveren Nutzung mit Reflektoren ausgestattet. Es sind deshalb in Strahlrichtung Sicherheitsabstände einzuhalten, der Lampenraum abzudichten und Schutzscheiben oder Drahtkörbe zu benutzen. Der vom Hersteller bestimmte und erforderliche Mindestabstand ergibt sich aus dem Aufdruck an der Leuchte oder aus dem Datenblatt. Im Zweifelsfall ist ein Mindestabstand von 0,5 m einzuhalten.

Handleuchten müssen mit nicht brennbaren Schutzgläsern und Schutzkörben oder bruchsicherem Überglas ausgestattet sein. Fehlen diese Schutzmaßnahmen, kann eine direkte Ankopplung der heißen Lampenoberfläche an Brennbares erfolgen. Solche Leuchten müssen von leicht entzündlichem Material fern gehalten werden. Sie sind mindestens in der Schutzart IP 54 (strahlwasser- und staubgeschützt) auszuführen. Nach dem Gebrauch ist der Stecker zu ziehen, was bei geschalteten Steckdosen unabdingbar ist, um eine versehentliche Inbetriebnahme auszuschließen.

Die Niedervoltlampen (NV-Lampen) haben mit etwa 85 % Verlustleistung gegenüber Glühlampen (Verlustleistung 90 % bis 95 %) eine wesentlich bessere Lichtausbeute. Diese beträgt bei NV-Lampen etwa 25 lm W^{-1} bis 31 lm W^{-1} (Glühlampe: 9 lm W^{-1} bis 18 lm W^{-1}). Die Temperatur des Glaskolbens liegt aber über 500 °C. Auch der Reflektor kann gefährliche Temperaturen über 200 °C erreichen. Die als Verlust auftretende Wärmeenergie im nicht sichtbaren IR-Bereich wird zu 90 % in Strahlrichtung abgegeben, weshalb ein Sicherheitsabstand einzuhalten ist. Die so genannten Kaltlicht-Reflektoren strahlen dagegen nur 40 % in Strahlrichtung ab, aber eben 60 % über den Reflektor und die Fassung ab. Die NV-Lampen können auch platzen und die erhitzten Teile in die Umgebung verbreiten. Dies gilt insbesondere für die Hochvolt-Halogenlampen, die an ihrem

Lebensende durch die Erhitzung des Füllgases infolge Lichtbogenbildung einen Binnendruck entwickeln, der den Glaskolben zerstört, weshalb ein Berstschutz sinnvoll ist.

Wegen der Verlustleistungen der Lampen ist bei Einbau in Hohlräume, z. B. in abgehängte Decken oder Möbel, für eine ausreichende Konvektionskühlung zu sorgen. Einbauten in schmale Hohlräume sind daher nicht unproblematisch.

Die Niedervolt-Halogen-Beleuchtung kann wegen zu hoher Oberflächentemperatur zur Brandursache werden, wenn falsche Vorschaltgeräte verwendet werden, die Konvektion vermindert ist und Lampen aus Fassungen fallen oder platzen. Hinzu kommen noch Fehler der Installation.

Alle Leuchten sind so zu befestigen, dass sie ihre bestimmungsgemäße Position nicht verändern. So müssen Stehleuchten einen tiefliegenden Schwerpunkt aufweisen, um das Umkippen zu verhindern. Aufhängevorrichtungen müssen ein Mehrfaches des Leuchtengewichtes tragen können (typisch 5-fach), um das Abstürzen von in Betrieb befindlichen Leuchten zu verhindern. Holzdübel, die austrocknen, verlieren ihre Spreizkraft und sind ungeeignet und unzulässig, vor allem, wenn sie im Deckenbereich eingesetzt sind.

Alle eigentlichen Wärmegeräte besitzen bestimmungsgemäß hohe Oberflächentemperaturen, insbesondere im Bereich der Heizwicklungen oder Heizstäbe. Solche Heizwicklungen finden sich in Haarföhen, in Direktheizgeräten, in Bügeleisen, an Lötapparaten, in Wärmespeicherheizgeräten und Wärmestrahlern. Sie dürfen in der Regel nicht in Kontakt mit Brennbarem kommen, was durch konstruktive Maßnahmen sicherzustellen ist. Ist ein Kontakt mit einer Heizfläche erforderlich, wie z. B. beim Bügeleisen, dann muss die Temperatur durch entsprechende Leistungsaufnahme oder durch Temperaturregeleinrichtungen begrenzt werden oder es ist eine Benutzung nur unter Aufsicht möglich. Gefährlich sind auch Ablagerungen, wie Flusen und Staub auf Heizstäben, -flächen oder -spiralen, wenn eine Reinigung unterbleibt. Werden Reinigungsmaßnahmen umgangen oder missachtet, so besteht die hohe Gefahr der Entzündung, insbesondere bei seltenem Gebrauch.

Jede Verdämmung von Wärmegeräten stellt einen nicht bestimmungsgemäßen Gebrauch dar und führt zwingend zu einem Wärmestau, der zur Entzündung des brennbaren Verdämmungsmaterials führen kann. Als Beispiel seien genannt das Ablegen von Kleidung oder Decken auf Heizgeräten oder Speicherheizkörpern zum Anwärmen oder Trocknen oder das Ablegen von Handtüchern oder Aufgussmaterial auf Saunaöfen oder das Verdämmen von Glühlampen. Auch auf Speicherheizgeräten abgelegte oder nur angelehnte Matratzen führen zu einem Wärmestau.

Beschädigungen von Vorrichtungen, die einen Sicherheitsabstand zu den heißen Oberflächen bewirken bzw. erzwingen, stellen immer eine Gefahr dar. Ein typisches Beispiel hierfür sind demontierte Abstandswinkel an Saunaöfen; diese hat der Hersteller so gestaltet, dass eben keine kritische Bestrahlungsdichte an der Befestigungswand auftritt und dass die kühlende Konvektion erhalten bleibt. Auch so genannte Strahlungsbleche sind bei Hinterlüftung wirksame Sicherheitseinrichtungen; wird die Hinterlüftung beseitigt oder gar nicht sichergestellt, ist ihre physikalische Funktion unwirksam gemacht. Solche

Strahlungsbleche sind auch über den Abgasanlagen der Kfz-Motoren als Schutzeinrichtungen vorhanden und dürfen nicht entfernt werden. Auch in Öfen darf das Strahlungsblech zwischen der Wandung des Feuerraums und des Tanks nicht entnommen werden.

Elektrospeicherheizgeräte besitzen eine Direktbeheizung der Schamottesteine, deren Masse sehr groß ist, um ein hohes Speichervermögen zu realisieren. Die hohe Kerntemperatur von bis zu 650 °C ist nur so lange ungefährlich, wie die Umkleidung bzw. Isolierungen ihre konstruktive Position und Wirkung aufweisen. Entfernen von Abdeckblechen oder thermischer Isolierungen führt zwangsläufig zu unzulässigen Temperaturen an den verbleibenden oder berührbaren Teilen. Durch Mischung von im Kern erwärmter Luft mit Raumluft wird eine moderate Temperatur an der Ausblaseöffnung herbeigeführt (maximal 210 °C) und in den Raum geleitet; wird aber der Austrittsquerschnitt reduziert, z. B. durch Möbel, Kisten oder Kleidung, so entsteht nach einer gewissen Verzugszeit ein Brandrisiko an diesen Gegenständen, weil die austretende Mischlufttemperatur gefährlich erhöht wird. Die Verdämmungsgefahr beginnt schon bei etwa 15 cm Entfernung von den Luftaustrittsgittern.

Es ist deshalb physikalisch zwingend, dass zu Oberflächen von Wärmegeräten ein Sicherheitsabstand einzuhalten ist, der den Herstellerangaben zu entnehmen ist. Jede Reduzierung der Abstände im Maß und in der Qualität ist immer brandgefährlich. Die angegebenen Abstände beziehen sich auf den bestimmungsgemäßen Betrieb. Die Erhöhung der Leistungsaufnahme oder der räumlichen Leistungsdichte in einem an sich sicherheitstechnisch korrekt dimensionierten Gerät stellt ebenfalls eine unzulässige Betriebsabweichung dar und ist einer Reduzierung des Sicherheitsabstandes äquivalent.

Die durch Strahlung übertragbare Wärmeleistung wird durch das bereits erwähnte T^4 -Gesetz bestimmt. Das bedeutet, dass schon bei Verdoppelung der Temperatur (in Kelvin!) eine Versechzehnfachung der Strahlungsleistung erfolgt. Wird die Temperatur vervierfacht, so wird die Strahlungsleistung um den Faktor 256 erhöht. Die Energieübertragung erfolgt durch elektromagnetische Strahlung, d.h. sie wirkt unabhängig vom Medium und deshalb auch bei und gegen den Wind (siehe auch Punkt 1.3.1.1).

Um sich oder Gegenstände vor Strahlung zu schützen, ist der Abstand zur Strahlungsfläche zu erhöhen. Die Abnahme der Strahlungsleistung erfolgt nach dem $1/r^2$ -Gesetz.

In der folgenden Abbildung 11 ist nach diesem Gesetz die Intensitätsabnahme als Funktion des Abstandes zur Quelle dargestellt. Dabei soll die Intensität bei dem Abstand r gleich 100 % gesetzt sein. Bei Vervielfachung des Abstandes (hier: $n = 1$ bis $n = 6$) nimmt die auftretende Intensität deutlich ab und zeigt den Effekt der Vergrößerung der Entfernung zur Quelle.

In der zweiten Abbildung wird der Effekt der Verdoppelung des Abstandes von einer Punktquelle graphisch dargestellt; die abgestrahlte Strahlungsleistung verteilt sich dabei auf die 4-fache Fläche.

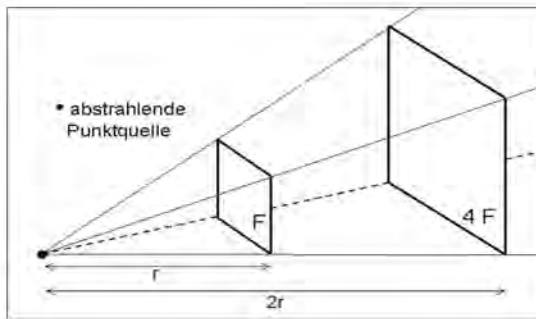
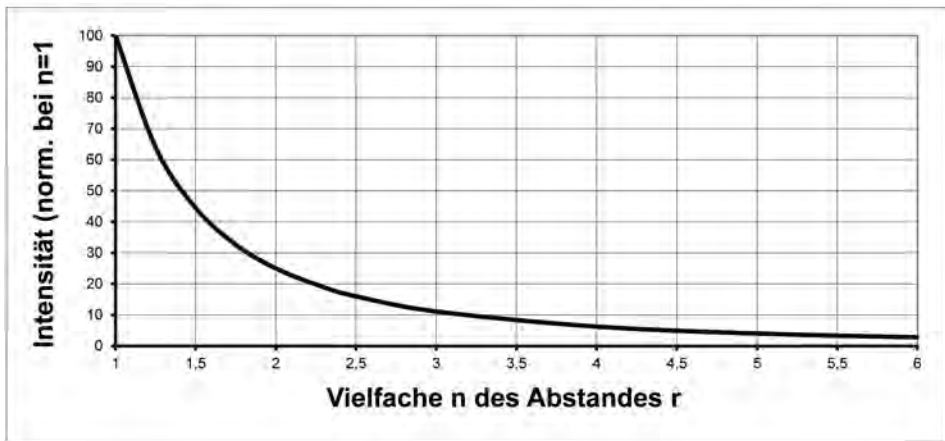


Abb. 11: Strahlungsleistung und Distanz: zu r^2 -Gesetz

Das bedeutet in der Praxis, dass sich bei Verdoppelung des Abstands zur Wärmequelle eine Viertelung der Strahlungsleistung ergibt. Die Anwendung dieses Gesetzes ist für den abwehrenden Brandschutz von großer Bedeutung, da bereits eine mäßige Vergrößerung des Sicherheitsabstandes eine deutliche Reduzierung der Energieübertragung auf die Einsatzkräfte oder auf die in der Nähe eines Feuers bzw. der heißen Oberfläche aufgestellten Gegenstände bewirkt. Bezüglich der Brandgefahr ist zu berücksichtigen, dass etwa brennbare Gegenstände (Gebäude) mit zunehmendem Abstand zur Wärmequelle deutlich weniger durch Wärmestrahlung gefährdet sind. In der Nähe befindliche Objekte sind dagegen zu kühlen, um Inbrandsetzungen durch Strahlung zu vermeiden.

Gelegentlich werden Schutzvorrichtungen verwendet, um zu hohe Temperaturen an den angestrahlten Flächen zu vermeiden. Diese können rein mechanisch wirken (Sicherheitsabstandsvorrichtungen, hinterlüftete Strahlungsschutzschilde) oder auch in einer simplen Temperaturmessung bestehen, die auf die Leistungssteuerung rückwirkt. Auch an Feuerstätten und vor Kfz-Katalysatoren finden sich Strahlungsschutzbleche, die nicht entfernt werden dürfen und dauerhaft hinterlüftet bleiben müssen.

4.3.5 Statische Elektrizität

Statische Elektrizität liegt vor, wenn elektrische Ladungen ruhen. Wesentlich ist eine Ladungstrennung, so dass sich Ladungen einer einzigen Polarität (positiv oder negativ) auf einem Körper im Überschuss befinden. Die Trennung erfolgt in der Grenzfläche zwischen zwei Stoffen, deren Leitfähigkeit gering ist und die sich relativ zueinander bewegen; eine solche Relativbewegung erfolgt bei der Trennung, aber auch beim Aneinandergleiten. Je höher die Relativgeschwindigkeit ist und je geringer die elektrische Leitfähigkeit der beteiligten Stoffe ist, desto wirksamer wird die Ladungstrennung. Der Werkstoff mit der höheren materialspezifischen Dielektrizitätskonstante erhält einen Elektronenüberschuss und wird deshalb eine negative Überschussladung aufweisen (Die Dielektrizitätskonstante beschreibt die Schwächung des elektrischen Feldes in einem nichtleitenden Medium bzw. die Vergrößerung der Kapazität eines Kondensators beim Einfügen des nichtleitenden Materials).

Eine hohe Trennungsgeschwindigkeit der sich berührenden Materialien verhindert einen selbständig ablaufenden und an sich möglichen Ladungsausgleich; sind die Relativgeschwindigkeiten hoch, wird die Ladungstrennung immer begünstigt.

Statische Elektrizität wird also bei vielen Trennvorgängen zu erwarten sein. Nachfolgend seien hierzu einige Beispiele erwähnt. Beim Rollen der Autoreifen auf der bitumengedeckten Straße ist auf Grund der Werkstoffeigenschaften eine Ladungstrennung nahe liegend, die umso wirksamer ist, je höher die Geschwindigkeit ist und je kürzer die Ausgleichszeit im Stand ist. Das Kämmen der Haare mit einem isolierenden Kamm führt zur Ladungstrennung und so zum Aufstellen der Haare infolge gleichnamig geladener Haare (Abstoßung). Bei industriellen Kalandern müssen Maßnahmen gegen das Auftreten zu großer Trennladungen getroffen werden, insbesondere wenn explosive Dämpfe gegenwärtig sind (z. B. Lösungsmittel, Druckfarben; siehe Punkt 4.7). Die der natürlichen Blitzentladung notwendigerweise vorangehende Ladungstrennung durch starke Winde führt zur Aufladung der Wolken (siehe Punkt 4.1.3). Auch schlecht leitende Flüssigkeiten, z. B. Kraftstoffe oder Lösungsmittel, führen zu Ladungsanhäufungen, die durch Erdungen abgeleitet werden müssen, um eine Zündung der vorhandenen explosiblen Atmosphäre zu verhindern. Beim Umfüllen von Flüssigkeiten und Stäuben ist eine Ladungstrennung nicht zu vermeiden. So müssen die Betankungsschläuche leitfähige Einlagen aufweisen. Auch das Zerstäuben von Flüssigkeiten, wie beim Lackieren und Versprühen, ist mit einer Ladungstrennung verbunden. Eine Ladungstrennung ist auch beim Fließen schlecht leitender Flüssigkeiten oder beim Transport von Stäuben in Kunststoffrohren oder beim Befüllen von Silos unvermeidlich. Beim Trennen von Textilien mit hohem Kunststoffanteil (z. B. Entkleiden) erfolgt in der Regel eine Ladungstrennung. Zerkleinerungs- und Mahlvorgänge führen ebenfalls zu Ladungstrennungen. Auch beim Gehen über isolierende Flächen (Kunststoffbeläge oder Teppiche geringer Leitfähigkeit) erfolgt eine derartige Ladungstrennung, wie nachfolgend gezeigt.

Zwischen elektrisch geladenen Körpern wirken Kräfte. Gleichartig geladene Körper stoßen sich ab, während ungleichartig geladene Körper sich anziehen. Deshalb sitzen gleichartige Ladungen immer an der Oberfläche eines Körpers, was bedeutet, dass sich im Inneren keine Ladungen befinden. An Spitzen oder kleinen Krümmungen sind sie

dichter verteilt. Die von einer Ladung auf einem Körper auf eine Probe ausgeübte Kraft ist proportional zur Ladung q ($As = C$).

$$F = q E \quad (As \text{ Vm}^{-1} = \text{J m}^{-1} = \text{kg m}^2 \text{ s}^{-2} \text{ m}^{-1} = \text{m kg s}^{-2} = \text{N})$$

E (Vm^{-1}) gibt die elektrische Feldstärke an, welche die Kraftwirkung zwischen den Ladungen beschreibt. Sie beschreibt das Verhältnis der auf eine Ladung im elektrischen Feld wirkenden Kraft F zur Größe dieser Ladung q und ist ein Vektor. Das elektrische Feld kann durch die elektrischen Feldlinien dargestellt werden und gibt an jedem Ort die Richtung der wirkenden Kraft an. Die Feldlinien verlaufen von der positiven zur negativen Ladung und treten senkrecht aus der Oberfläche aus. Es gibt keine in sich geschlossenen elektrischen Feldlinien; das Feld ist wirbelfrei.

Die Feldstärke kann, insbesondere an Spitzen, so hoch sein kann, dass die Luft ionisiert wird und Ladungen den geladenen Körper verlassen. Wird die Durchbruchfeldstärke der Luft von etwa 3.000 V mm^{-1} unter Normalbedingungen überschritten, erfolgt ein Ladungsausgleich. Erst beim Ladungsausgleich erfolgt ein Stromfluss. Dieser ist im Dunklen durch die Beobachtung kleiner Entladungsblitze oder im Menschen durch den Entladungsstrom (schwacher Stromschlag) wahrnehmbar.

Der Mensch selbst kann eine Kapazität von etwa 150 pF aufweisen. Typischerweise kann beim längeren Gehen durch Ladungstrennung zwischen isolierender Schuhsohle und nicht leitfähigem Untergrund eine Spannung von über 10.000 Volt herbeigeführt werden.

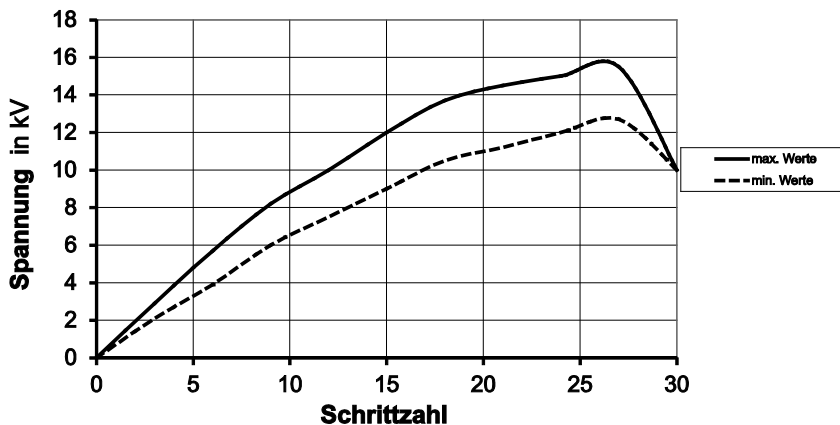


Abb. 12: schrittweise Erhöhung der Ladespannung auf dem Menschen beim Begehen eines isolierenden Teppichs

Die in einem Kondensator mit der Kapazität C ($A \cdot s \cdot V^{-1}$ oder Farad) gespeicherte Ladung Q kann bei einer bekannten Ladespannung U wie folgt berechnet werden:

$$Q = C U \quad (\text{As} = \text{Coulomb})$$

Die beim Ladungsausgleich freiwerdende Energie lässt sich unschwer abschätzen; im Fall des Menschen, der als Kondensator wirkt, kann die Energie bei einer Ladespannung von $U = 10.000 \text{ V}$ bestimmt werden:

$$W = \frac{1}{2} U Q = \frac{1}{2} U^2 C = 7,5 \cdot 10^{-3} \text{ Ws} (= \text{J}) = 7,5 \text{ mJ}$$

Dieser Wert liegt erheblich höher als die Mindestzündenergie der meisten zündfähigen Gase und Dämpfe und begründet die vom geladenen Menschen ausgehende Zündgefahr. Die Mindestzündenergie der üblichen Lösungsmittel-Luft-Gemische beträgt zirka 0,3 mJ bis 1 mJ. Sehr leicht entzündbare Stoffe wie Acetylen, Wasserstoff und Schwefelkohlenstoff weisen im Gemisch mit Luft Mindestzündenergie-Werte von weniger als 0,025 mJ auf. Die Mindestzündenergie der brennbaren Stäube überstreicht einen weiten Bereich. Einige Stäube weisen eine Mindestzündenergie von weniger als 10 mJ auf. Vereinzelt liegen Stäube sogar unterhalb 1 mJ.

Es ist deshalb auch nicht ausgeschlossen, dass sich eine Person durch Reibung auf dem Kunststoffbezug des Sitzes auflädt und beim Aussteigen beim Berühren geerdeter Gegenstände, z. B. an einer Zapfpistole der Tankstelle, entlädt.

Grundsätzlich sind beim Auftreten von Ladungstrennungen besondere Schutzmaßnahmen erforderlich, um die Zündung von brennbaren Gasen und Dämpfen zu verhindern. Als Schutzmaßnahmen sind zu nennen

- konsequentes Erden aller Anlagenteile und Behälter,
- Erhöhung der Leitfähigkeit des zu transportierenden Gutes,
- Erhöhung der Leitfähigkeit der Rohre und Schläuche u. ä.,
- Erhöhung der relativen Luftfeuchte und
- Ionisieren der Luft.

Umfangreiche Sicherheitsvorschriften und Unfallverhütungsvorschriften sind hierzu erlassen worden.

Eine direkte Entzündung von Feststoffen durch eine elektrostatische Entladung ist wegen der relativ geringen innewohnenden Energie nicht möglich. Wie bereits erwähnt, ist aber die Zündung explosibler Atmosphären aus energetischer Sicht unschwer möglich, so dass Raumexplosionen (Brennstoffe: Gase, Dämpfe, Stäube) herbeigeführt werden können. Es kann sich dieser elektrostatisch gezündeten Atmosphäre bei günstiger Ankopplung ein Folgebrand anschließen.

4.3.6 Dynamische Elektrizität

4.3.6.1 Errichtungs- und Wartungsregeln

Wegen des hohen Elektrifizierungsgrades kann nahezu in jedem Brandobjekt davon ausgegangen werden, dass im Rahmen des Eliminationsverfahrens auch die elektrische Anlage und die elektrischen Betriebsmittel zu untersuchen und zu beurteilen sind, weil Fehlerströme (dynamische Elektrizität) grundsätzlich brandgefährlich sind. Da die elektrischen Betriebsmittel aber häufig zumindest teilzerstört sind, wird bei einem unzulässig verkürzten Eliminationsverfahren Strom zu häufig als Brandursache genannt. Es ist deshalb fast immer eine detaillierte Untersuchung der elektrischen Anlage und der möglicherweise vorhandenen Spuren erforderlich, um eine gesicherte Aussage zu treffen.

Da von jeder elektrifizierten Anlage tatsächlich eine Brandgefahr ausgehen kann, muss bei der Errichtung und auch bei späteren Überprüfungen eine große Zahl von Gesetzen, Normen und Vorschriften beachtet werden. Diese sind bei einer sachkundigen Ermittlung einer Brandursache häufig heranzuziehen. Zu verweisen ist daher auf

- Baugesetze,
- DIN-VDE-, DIN- und EN-Normen,
- Musterbauordnung,
- Muster-Leitungsanlagenrichtlinie MLAR,
- Gerätesicherheitsgesetz,
- Unfallverhütungsvorschriften,
- Vertragsbedingungen der Energieversorger AVBEItV,
- VdS-Richtlinien,
- Betriebssicherheitsverordnung und
- andere Vorschriften, Verordnungen und Normen.

Die Aufzählung ist nicht vollständig, da es viele Einzelvorschriften gibt, die Spezialfälle abdecken. Im Zentrum stehen ohne Zweifel die mittlerweile sehr umfangreichen VDE-Bestimmungen der Reihe 0100, die als Errichtungsbestimmungen von grundsätzlicher Bedeutung sind. Die Reihe 0105 ist für den Betrieb der elektrischen Anlage bedeutungsvoll. Diese Norm gilt für das Bedienen von elektrischen Anlagen und allen Arbeiten daran, direkt oder in der Nähe dieser Anlagen. Hierbei handelt es sich um elektrische Anlagen aller Spannungsebenen von Kleinspannung bis Hochspannung.

Das geforderte Sicherheitsniveau verlangt nach vielen Einzelregelungen, was sich beispielsweise besonders eindrucksvoll in der immensen Zahl von DIN-VDE- und EN-Bestimmungen niederschlägt, die zudem noch im Rahmen der internationalen Harmonisierung ständigen Änderungen unterzogen werden. Viele Einzelregelungen bei den Errichtungsbestimmungen können daher auch zu Errichtungsmängeln führen, wenn sich

der Errichter die hohe Zahl von Vorschriften und Bestimmungen nicht laufend zu eigen macht. Wegen der zahlreichen Vorschriften u. ä. kommt es nicht selten zu Informationslücken, durch die eine elektrisch begründete, aber häufig latente Brandgefahr herbeigeführt werden kann. Neben der Sachuntersuchung stellt sich daher oft die Frage nach der Sachkunde der Errichter, insbesondere bei Laienarbeiten.

Die Errichtungsbestimmungen verlangen, dass weder die im Betrieb noch im Fall der Überlastung und des Kurzschlusses entstehenden Temperaturen die Anlage selbst und auch nicht die Umgebung der Anlage gefährden dürfen. In Abschnitt 4.3.6.2 werden die Mechanismen der Schädigung der Isolierung von Betriebsmitteln beschrieben, die bei Einhaltung der Errichtungsbestimmungen durchaus verhindert oder zumindest minimiert werden können. Der Grund für die umfangreichen Sicherheitsvorschriften besteht darin, dass Fehlerströme, Lichtbögen und Verstöße gegen Sicherheitsvorschriften grundsätzlich eine Brandgefahr implizieren, was in den folgenden Kapiteln 4.3.6.2.2 und 4.3.6.2.3 dargelegt wird.

Beispielsweise dürfen Verteilereinrichtungen und Zählerplätze nicht auf brennbaren Baustoffen montiert werden. Die einfachen Stegleitungen sind nur im Putz zu verlegen und dürfen nicht auf brennbaren Materialien befestigt werden. Mantelleitungen (z. B. NYM) dürfen keinesfalls als bewegliche Leitungen missbraucht werden. Andererseits dürfen leicht entzündliche Materialien nicht in der Nähe elektrischer Betriebsmittel gelagert werden. Auch geflickte bzw. überbrückte Sicherungsorgane stellen ein Brandrisiko dar, weil deren Schutzfunktion dadurch torpediert ist. Sicherungssockel für Schraub Sicherungen dürfen nur mit dem Passeinsatz benutzt werden, um eine Fehlbestückung mit höherem Bemessungsstrom (Auslösestrom) zu verhindern. Wärmegeräte dürfen nur nach den Angaben der Betriebsanleitung eingesetzt werden; hierunter gehört insbesondere das Verbot deren Verdämmung oder der Unterschreitung des Sicherheitsabstandes. Schutzeinrichtungen, wie Sicherungen oder Temperaturbegrenzer oder Näherungsschalter dürfen nicht unwirksam gemacht werden, auch wenn dies ein einfacheres Arbeiten ermöglicht.

Diese Beispielliste ließe sich beliebig fortsetzen. Sie kann nur als bescheidener Hinweis auf das richtige Errichten, Unterhalten und Reparieren von technischen Einrichtungen verstanden werden, für die die erwähnten Normen und Hinweise veröffentlicht wurden. Die Kenntnis der Errichtungsbestimmungen ist bei der Brandursachenerforschung von großer und unverzichtbarer Bedeutung.

4.3.6.2 Brandzündung durch Stromeinwirkung

Elektrischer Strom führt zu Wirkungen, die bestimmungs- und wunschgemäß sind, aber auch zu unerwünschten, brandgefährlichen Wirkungen. Nur durch ordnungsgemäße Errichtung, sachgerechte Wartung, Mängelbeseitigung und bestimmungsgemäßen Betrieb kann die Gefahr begrenzt werden, wobei technische Mängel sich häufig latent entwickeln.

Strombedingte Brandursachen lassen sich daher in drei Hauptgruppen einteilen.

- vorschriftswidrige Planung und Errichtung
- nicht bestimmungsgemäßer Gebrauch und Betrieb
- technische Defekte

Brände, die durch Stromeinwirkung gezündet werden, sind häufig und stehen in Zusammenhang mit der hohen Elektrifizierung der Gebäude und deren intensiver Nutzung. Die elektrischen Betriebsmittel werden nicht selten im Grenzbereich des Zulässigen betrieben und auch gelegentlich überlastet. Als Schadensmechanismen kommen verschiedene Mängel in Betracht, die bei der Feststellung der Brandursache in das Eliminationsverfahren einzubeziehen und die später noch detailliert zu besprechen sind.

Wesentlicher Schutz vor der unerwünschten Wirkung des elektrischen Stromes besteht darin, den Strom nur innerhalb vorbestimmter Bahnen fließen zu lassen, was durch eine durchgehende Isolierung mit niedrigster Leitfähigkeit erzwungen wird. Wo eine Isolierung aus technischen Gründen fehlt, wie zum Beispiel bei Trennstrecken oder in Schaltern oder Schaltanlagen, muss eine zusätzliche Einhausung mit isolierendem Material (Gehäuse) vorgenommen oder eine in sicherem Abstand installierte Abschrankung errichtet werden. Es ist also wesentliches Ziel, während der Errichtung, des Betriebs und der Wartung, den Isolationszustand dauerhaft aufrecht zu erhalten. Es sind daher besondere Maßnahmen erforderlich, die Qualität der Isolierung zu erhalten oder zumindest zu überwachen, um rechtzeitig eine Wiederherstellung der optimalen Isolierung durchführen zu können. Messungen des Isolationswiderstandes von Isolierungen sind daher immer unverzichtbar. Die Notwendigkeit dieser relativ einfach durchzuführenden Prüfung ergibt sich aus der Kenntnis der Schädigungsmechanismen der Isolierung, weil diese nicht immer sofort zu einer Beeinträchtigung der Betriebssicherheit führen, sondern lange Zeit latent bleiben können; messtechnisch kann man aber durchaus schon im Frühstadium eine Beeinträchtigung des Isoliervermögens erkennen.

4.3.6.2.1 Mechanismen der Schädigung der Isolierung

Es existieren viele Mechanismen der Schädigung der Isolierung, die hier getrennt und systematisch dargestellt werden, aber in der Schadenspraxis durchaus gleichzeitig auftreten können und zusammenwirkend einen Schaden begründen.

1 Isolationsmangel

Durch die Isolation eines elektrischen Leiters wird bewirkt, dass Strom nur innerhalb vorbestimmter Bahnen fließt. Dadurch soll eine direkte Berührung von spannungsführenden Teilen verhindert werden (Personenschutz), aber auch der unzulässige Übertritt von Strom auf andere Leiter oder Anlagenteile unterbunden werden (Sachschutz).

In elektrischem Sinn bedeutet dies, dass die Isolation einen hohen Isolationswiderstand aufweisen muss, weshalb nur Isolierstoffe mit geringer elektrischer Leitfähigkeit oder größere Luftstrecken zur Anwendung kommen. Der Isolationswiderstand ist natürlich nicht dauerhaft konstant, weil er von äußeren Parametern negativ beeinflusst wird. Das bedeutet, dass bei Herabsetzung des Isolationswiderstandes ein unzulässiger fehlerhafter Strom (Fehlerstrom) wirken kann, der den Isolationszustand progressiv verringert und

zunehmend eine Gefährdung von Sachen und Personen impliziert. Als Grenzwert wird in elektrischen Energienlagen ein Isolationswiderstand von $1.000 \Omega V^{-1}$ angenommen, was bei einer haustechnischen Installation zu einem Fehlerstrom von 1 mA führt, welcher unter der Wahrnehmbarkeitsgrenze des Menschen liegt. Unbedenklich sind somit Isolationswiderstände von $\geq 230 \text{ k}\Omega$ (bei 230 V) und $\geq 400 \text{ k}\Omega$ (bei 400 V). Erleichterungen werden bei IT-Systemen und bei Anlagen mit Wasserbeaufschlagung eingeräumt; diesbezüglich ist auf die speziellen Vorschriften in den Errichtungsbestimmungen zu verweisen.

Der Fehlerstrom an der Schwachstelle der Isolierung ist anfangs sehr niedrig und als Gefahrenquelle unbedeutend. Im o.a. angegebenen Grenzwert würde allenfalls eine Fehlerleistung von 0,2 W erreicht werden. Der Fehlerstrom stellt sich als so genannter Kriechstrom ein, welcher an der Oberfläche der Fehlerstelle, z. B. in der Rissfläche, zum Fließen kommt. Dieser schädigt auf seinem Weg das Isoliermaterial und begünstigt durch die dabei entstandenen Verkohlungsstrecken das Ansteigen des fehlerhaften Stroms. Damit nimmt auch proportional die an der Fehlerstelle umgesetzte Fehlerleistung zu. Die Isolierung kann oberflächlich auch durch mikroskopische Lichtbögen (siehe Punkt 4.3.6.2.3 1.) geschädigt werden, deren Zahl mit fortschreitender Schädigung zunimmt. Wenn der Leistungsumsatz an der Fehlerstelle etwa 40 Watt erreicht, dann besteht eine Brandgefahr, wenn brennbares Material anliegt oder wenn das Isoliermaterial zu brennen anfängt. Manche Autoren nennen aus Sicherheitsgründen noch geringere kritische Fehlerleistungen.

Alle mechanischen Belastungen (Zug, Druck, Torsion) können die relativ leicht verformbare (thermoplastische) Isolierung beschädigen. Dies erfolgt durch Verformung und Fließen des Isolierstoffes. Starkstromleitungen, wie z. B. NYM-Leitungen, sind für die Verlegung im Erdreich daher nicht geeignet, weil Steine punktuell schädigenden Druck ausüben. Auch Befestigung von isolierten Leitungen mittels Nägeln führt gerade bei erhöhten Temperaturen zu erheblichen Reduzierungen des wirksamen Isolierquerschnittes. Auch das Bündeln von Leitungen mittels Draht und die Drahtaufhängung sind unzulässige Befestigungsarten. Starre Leitungen dürfen keinen Vibrationen ausgesetzt und auch nicht als flexible Betriebsmittel verwendet werden. Stegleitungen dürfen wegen der reduzierten Isolierung nicht auf Holz und anderen brennbaren Materialien verlegt werden.

Ergänzend ist noch darauf hinzuweisen, dass die kapazitiven Ableitströme an isolierten Leitungen sehr gering sind, allerdings mit der Leitungslänge zunehmen. Eine Brandgefahr ist damit aber nicht gegeben. Bei elektrischen Geräten ist der Ableitstrom zum Erdpotential dagegen sehr wohl zu berücksichtigen.

2 Alterung der Isolierung

Isoliermaterial besteht überwiegend aus Polymeren, deren Eigenschaften sich mit der Einsatzzeit negativ verändern, was als Alterung bezeichnet wird. Dies betrifft die mechanischen als auch die elektrischen Eigenschaften und ist hauptsächlich auf den Verlust von Weichmachern zurückzuführen. Bei erhöhten Temperaturen wird dieser Alterungsprozess stark beschleunigt. Die erhöhte Temperatur kann sowohl durch die Umgebung als auch im Fall der Überlast durch innere Erwärmung des Leiters herbeigeführt werden.

Man geht heute bei einer Betriebstemperatur der PVC-Leitungen von 70 °C (DIN VDE 0298-4) von einer Lebensdauer der Isolierung von ca. 20 Jahren aus. Wird diese Grenztemperatur überschritten, sinkt die Gebrauchsdauer z. B. bei 80 °C auf 6 Jahre und bei 90 °C auf 2 Jahre ab.

Solche Alterungserscheinungen zeigen sich durch eine Verfärbung des Isoliermaterials an. So werden weiße PVC-Isolierungen zunehmend dunkler bis zur Braunfärbung. Die Leitungen fallen durch ihre Verfestigung bzw. sogar durch Brüchigkeit der Isolierung auf. In diesem Zustand ist ihre Gebrauchsfähigkeit mit Sicherheit nicht mehr gegeben. Auf solche Veränderungen der Isolation ist im Brandfall zu achten und kann meistens nur an Vergleichsstellen rekonstruiert werden. Wesentlich ist die Prüfung, ob eine Alterung überhaupt gegeben war.

In Folge der Alterung treten Mikrorisse in der Isolierung auf, die beim Bewegen progressiv verstärkt werden, bis makroskopische Risse entstehen. In den Rissen wird durch Kapillarwirkung bevorzugt Feuchtigkeit aus der Umgebungsluft akkumuliert. Treten zusätzlich noch Verschmutzungen durch Feinstaub, Salze oder Laugen hinzu, so entsteht ein gut leitender Elektrolyt, der bei Vorliegen von Potentialunterschieden das Auftreten wirksamer Fehlerströme (Kriechströme) begünstigt. Die Fehlerströme schädigen die Isolierung progressiv, indem durch lokale Erwärmung das Isoliermaterial zunehmend pyrolysiert und dann wieder strombedingt getrocknet wird. Während dieser Zyklen werden Leitfähigkeitsinseln erzeugt, die minimale Lichtbogenüberschläge ermöglichen, so dass letztlich ein größerer Lichtbogen gezündet wird, der Brennbares entflammen kann.

Auch tiefe Temperaturen können schädigend wirken, weil die Polymere biegesteif werden. So können beim sorglosen Verformen und Biegen die Streckgrenze überschritten werden und Mikrorisse entstehen. Der weitere Schädigungsmechanismus erfolgt dann wie oben bereits beschrieben. Der Schadensmechanismus entspricht dem unter 1 beschriebenen Schadensablauf.

3 UV-Schädigung

Ultraviolette Strahlung (Wellenlänge < 350 nm) schädigen die Polymere (PE, PP, PVC, PS) im Sinne einer vorzeitigen Alterung dauerhaft. Der nicht sichtbare UV-Anteil im Sonnenlicht reicht hierfür aus. Deshalb sollten die isolierten Leitungen vor Sonnenlicht geschützt in Rohren, Kanälen oder unter Putz verlegt werden. Man erkennt diese Schädigung an einer Verfärbung und Versprödung des Isoliermaterials, wie dies beim Alterungsprozess bekannt ist.

4 Vorschädigung von Isolierstoffen

Als Vorschäden können alle mechanischen Einwirkungen, also Verformungen, Quetschungen, Tordierungen und Temperaturschäden zum Tragen kommen, welche beim Hersteller, bei der Verladung, der Anlieferung zur Baustelle und beim Verarbeiten herbeigeführt werden können. Unsachgemäße oder nachlässige Abisolierungsmaßnahmen der äußeren Schutzisolierungen können auch die innere Betriebsisolierung von Leitungen schädigen. Auch Schäden bei der Herstellung und Konfektionierung der Leitungen beim Hersteller sind bekannt. Schließlich treten auch beim Einziehen von isolierten Leitungen z. B. in Kanälen oder Rohren oder Mauerdurchbrüchen oder Wanddurchführungen unbemerkt Vorschäden auf, die später beim Betrieb brandgefährlich werden können.

5 Überspannungen

Bei Schaltvorgängen im Bereich der Verteilernetzbetreiber (VNB) bzw. Elektroversorgungsunternehmen (EVU) oder bei indirekten Blitzeinschlägen (siehe Punkt 4.1.3) können erhebliche Überspannungen im Verteilungsnetz und in den Verbraucheranlagen entstehen. Diese erreichen Werte bis zu 10.000 Volt. Dafür sind die Isolierungen und Isolations- oder Luftstrecken nicht ausgelegt oder wirtschaftlich auslegbar. Es kommt zu Durch- und Überschlägen, welche auf der Überschlagsstrecke dauerhafte Schäden verursachen. Dadurch werden Kriechströme begünstigt, in Folge Glimmentladungen ausgelöst oder gar größere Lichtbögen (siehe Punkt 4.3.6.2.3: 1.) gezündet.

Die Schäden sind irreversibel und heilen nicht aus. In Zusammenwirken mit anderen Schädigungsmechanismen kann daher erheblich zeitverzögert ein brandkritischer Zustand herbeigeführt werden. Dabei ist es selten möglich, auf den Ursprungsschaden der Überspannung beweissicher rückzuschließen. Hier sind unbedingt Zusatzinformationen heranzuziehen.

6 Nullleiterunterbrechung, höhere Harmonische

Das Drehstromsystem besteht aus drei Einphasenspannungen, die miteinander verkettet sind und zwischen denen eine Phasenverschiebung von 120° besteht. Fließt der Dreiphasenwechselstrom durch drei gegeneinander räumlich versetzte Wicklungen, dann wird ein magnetisches Drehfeld generiert, das den Dreiphasenwechselstrom als Vierleiternetz oder *Drehstrom*-Netz bezeichnet.

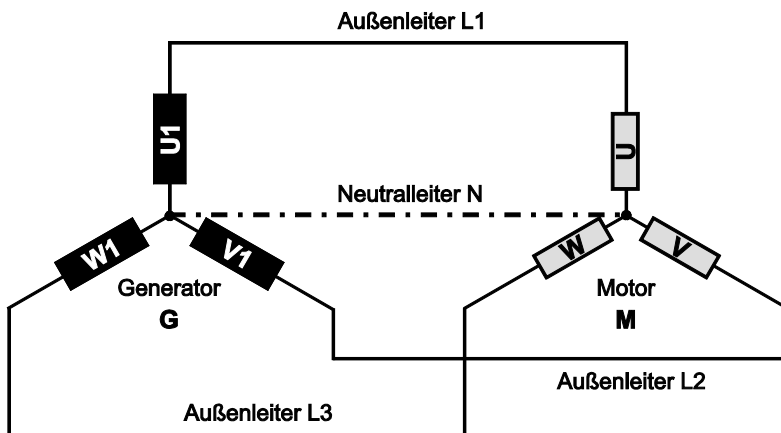


Abb. 13: im Drehstromsystem versorgt der Generator G den Motor M (oder die Verbraucher) mit Energie, hier in der so genannten Sternschaltung

Im Drehstromsystem können durch Separieren des Sternpunktes der Sekundärwicklungen des Transformators zwei Netzspannungen bereitgestellt werden: 230 V und 400 V. Die Herausführung des Sternpunktes erfolgt als N-Leiter oder als PEN-Leiter (geerdeter N-Leiter). Werden die drei Außenleiter L1, L2 und L3 gleichmäßig belastet, so führt der

vom Verbraucher zum Sternpunkt verlegte N-Leiter keinen Strom; es liegt in Sternschaltung ein so genannter symmetrischer Belastungszustand vor.

In der Praxis liegt aber selten ein symmetrischer Belastungszustand vor. Bei einer solchen unsymmetrischen Belastung, bei der die Verbraucher U, V und W differierende Widerstände aufweisen, was in den 3 Stromkreisen in der Praxis der Fall ist, fließen unterschiedliche Ströme durch diese; nach geometrischer Addition dieser Ströme ist daher ein Strom auch im Neutralleiter N zu erwarten. Um aber die Spannungen an den Verbrauchern konstant zu halten, muss der Sternpunkt optimal geerdet sein (Abb. 14: links).

Bei Unterbrechung des Neutralleiters N (Nullleiter) oder bei widerstandsbehafteten Verbindungen zur Erde verschiebt sich der Sternpunkt, so dass Über- und Unterspannungen in den verketteten Außenleitern entstehen. Die elektrischen Betriebsmittel werden dadurch gefährdet, weil sie für höhere Überspannungen nicht ausgelegt sind und so in einen brandgefährlichen Zustand überführt werden. Eine ähnliche Situation entsteht beim partiellen Erdschluss eines Außenleiters, wie schematisch in Abb. 14: rechts gezeigt ist.

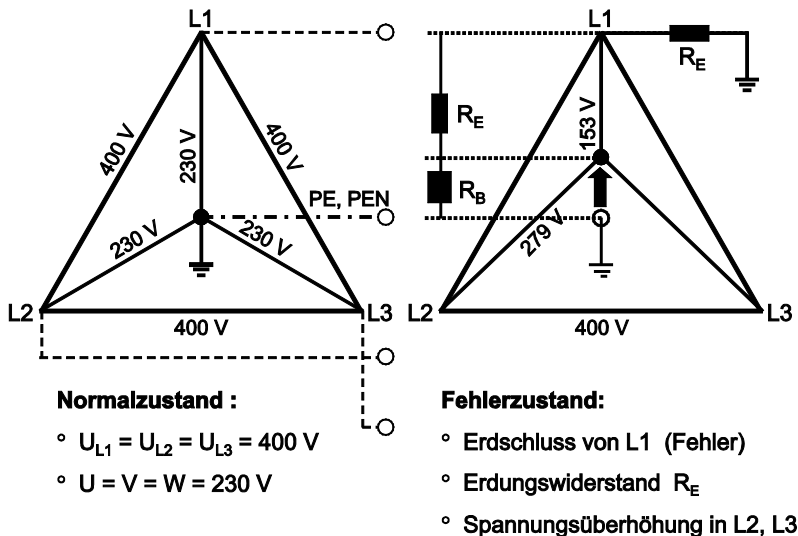


Abb. 14: schematische Darstellung der Sternpunktverlagerung im Drehstromsystem (4-Leiter-System, Betriebserdung R_B) mit Über- und Unterspannungen bei einem Erdschluss des Außenleiters L1 (R_E)

Eine Sternpunktverlagerung und eine asymmetrische Belastung des Drehstromsystems haben zur Folge, dass der bei symmetrischer Belastung noch stromlose PEN-Leiter (N-Leiter) nunmehr einen Strom aufnehmen muss. Dieser kann bei alten Anlagen mit dem 3½-Leiter-Kabel (N-Leiterquerschnitt 50 % des Außenleiter-Querschnitts) zu einem gefährlichen Überlastungsfall führen. In neueren Anlagen kommt die Strombelastung durch die Oberschwingungen und die häufige asymmetrische Belastung hinzu. Außerdem können bei einem Kurz- oder Erdschluss deutliche Spannungsanhebungen erfolgen.

Wird durch einen Verbraucher z. B. das Überstromschutzorgan L1 (siehe Punkt 4.3.6.3) ausgelöst, wird ein Drehstromverbraucher nur 2-phasig spannungsversorgt. Wegen der Verkettung der Außenleiter L2 und L3 kommt es zur geometrischen (!) Addition der beiden Außenleiterströme, so dass der gemeinsame querschnittsreduzierte Neutralleiter überlastet wird.

Auch beim Betrieb von zwei 230 V-Verbrauchern an unterschiedlichen Außenleitern, also jeweils an 400 V Spannung, fallen sodann an den in Reihe geschalteten Geräten Spannungen ab, die ihren Widerständen entsprechen; so kommt es an dem leistungsärmeren Gerät (höherer Innenwiderstand) zu einer Spannungsüberhöhung, die die Einsatzgrenze deutlich übersteigt. So können gerade bei Nulleiterunterbrechung so genannte Stand-By-Geräte in einen brandkritischen Zustand geraten.

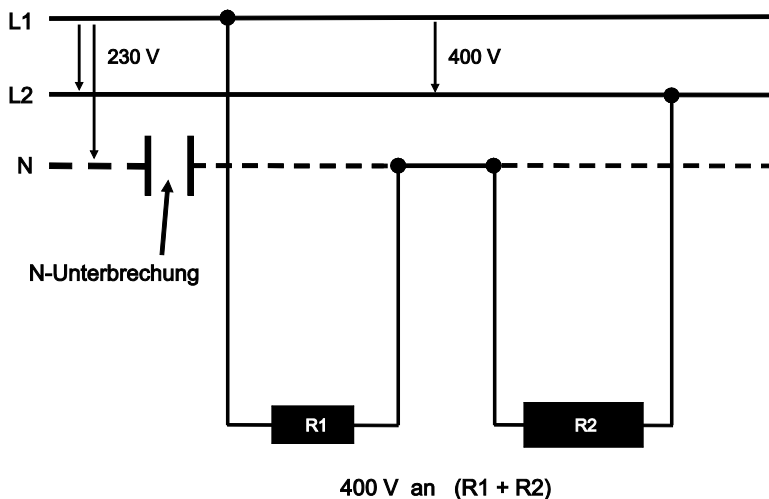


Abb. 15: N-Leiterunterbrechung bei zwei an unterschiedlichen Außenleitern betriebenen Verbrauchern

Durch die PEN- bzw. N-Leiter-Unterbrechung liegen die beiden Geräte R1 und R2 in Reihe und bei Betrieb an unterschiedlichen Außenleitern L1 und L2 an der Spannung $U_{L1-L2} = 400$ Volt. Unterstellt man für das Gerät R1 eine Leistungsaufnahme von 150 W (TV-Gerät) und für R2 eine solche von 2.500 W (Heizgerät), dann besitzt R1 einen Widerstand von 353Ω , während R2 nur einen solchen von 21Ω aufweist. Daraus lassen sich im Spannungsteiler die Betriebsspannungen errechnen

$$U_1 = U R_2 / (R_1 + R_2)$$

also für $U_1 = 378$ V

$$U_2 = 22$$
 V

Die Betriebsspannung des TV-Gerätes ist aber 230 V, so dass sich eine Spannungsüberhöhung von 64 % ergibt. Dafür ist das Gerät nicht ausgelegt und wird daher zerstörend betrieben, was als Brandursache zu werten ist.

In einem TN-C-System, wo mehrere Verbraucher gleichzeitig an einem Außenleiter betrieben werden, kann bei Unterbrechung des PEN-Leiters eine Überlastung des verbraucherseitigen PEN-Leiters entstehen, wenn nur ein Verbraucher eine klassische Nullung (Erdung) aufweist. Bei dieser Konfiguration fließen alle Betriebsströme über diesen Erdanschluss, wie nachfolgend dargestellt.

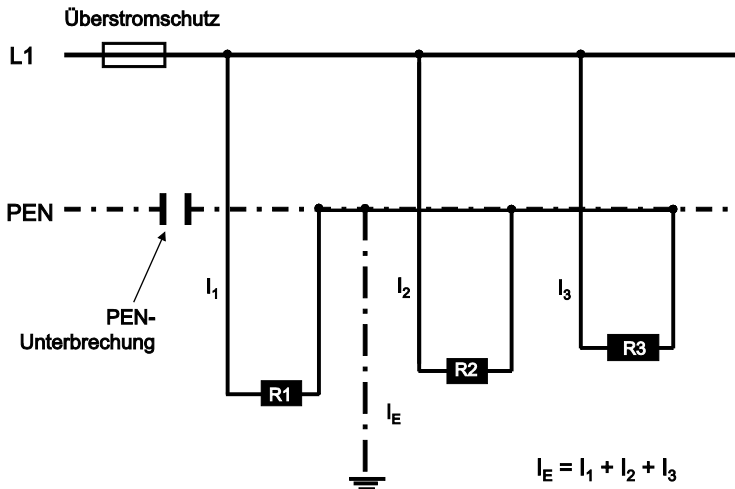


Abb. 16: PEN-Unterbrechung und mehrere Verbraucher mit einer Nullungsstelle

Ein solcher Überlastungsfall tritt in Altanlagen TN-C auf, wo eben nur eine 2-adrige Installation vorliegt (L1 und PEN). Solche Anlagen sollten durch das sichere TN-S-System ersetzt werden (L1, N, PE). In neueren Anlagen ist im Hausanschlussbereich (Steigleitung) der PEN-Leiter grundsätzlich mit einem Mindestquerschnitt von 10 mm^2 in Kupfer auszuführen, weil damit eine höhere Betriebssicherheit zu erwarten ist. Allerdings treten bei Unterbrechungen auch dieses querschnittstarken PEN-Leiters oder im Freileitungsnetz die geschilderten Probleme auf. Das gilt auch, wenn der Brand zuerst den PEN-Leiter zerstört.

Die Gefahr wird nicht nur durch eine Unterbrechung des Neutralleiters sondern auch bei einem widerstandsbehafteten Anschluss des Neutralleiters an den N-Leiter des Netzbetreibers wirksam, zum Beispiel an der Übergabestelle (Hausanschluss). Sie bemisst sich nach den Teilwiderständen der Verbraucher und des Übergangswiderstandes am N-Leiter-Anschluss.

Wird der PEN-Leiter durchtrennt und erhält er dabei zufällig Kontakt mit einem Außenleiter, so wird die Spannung L1 über den Schutzleiter auf das Gehäuse eines Betriebsmittels geleitet und von dort über eine Zwangserdung, wie einen Wasseranschluss, zur Erde abgeleitet. Das entspricht einem Körperschluss (siehe Punkt 4.3.6.2.3: 7.). Der

Strom wird nur durch die Teilwiderstände der stromdurchflossenen Leitungen und den Erdungswiderstand der Zwangserdung und des Transformators begrenzt. Es ist deshalb mit einer brandgefährlichen Überlastung der Leitungen und der Rohrverbindungen des Wasseranschlusses zu rechnen.

Diese Gefahr kann nur minimiert werden, wenn ordnungsgemäß installiert oder errichtet wird und alle Leitungsverbindungen im Neutralleiter widerstandsarm (siehe Punkt 4.3.6.2.3: 3.) ausgeführt werden und keine Unterbrechung erfolgen kann. Insbesondere darf der Neutralleiter nicht alleine geschaltet werden. Deshalb darf im Neutralleiter auch kein Überstromschutzorgan installiert werden. Die Verlegung der Leitung ist so gesichert auszuführen, dass keine schädigende mechanische Beanspruchung erfolgt. Problematisch ist auch bei 2-adrigen Systemen der unsachgemäße Einbau von Schaltern in den PEN-Leiter, wenn damit auch ein Steckdosen-Stromkreis oder Geräte der Schutzklasse I geschaltet werden. Es besteht Brandgefahr und eine Personengefährdung, weil dann an den Gehäusen der Geräte der Schutzklasse I immer die Netzspannung ansteht.

Neuerdings stellen auch die höheren Harmonischen der Netzfrequenz von 50 Hz durch den zunehmenden Einsatz von elektronischen Leistungsstellern eine Brandgefahr dar, weil die Neutralleiter überlastet werden. Diese Verbraucher sind nichtlineare Verbraucher, deren Strom einen nichtlinearen Verlauf zur Netzspannung aufweist. Höhere harmonische Schwingungen (Oberschwingungen) sind ganzzahlige Vielfache der Netzfrequenz von 50 Hz (USA 60 Hz), wobei die ungeraden Harmonischen zu berücksichtigen sind. Die nicht rein sinusförmigen Frequenzen im realen Netz können nach der Fourier-Analyse in viele Oberschwingungen mit unterschiedlichen Amplituden zusammengesetzt werden. Das Frequenzspektrum besteht also aus der Grundfrequenz und den höheren Harmonischen.

Besonders problematisch ist die so genannte dritte Harmonische (150 Hz) mit vergleichsweise hoher Amplitude, weil sich bei der hier gegebenen Phasengleichheit die Ströme im Neutralleiter arithmetisch addieren, so dass im Neutralleiter der dreifache Strom der 3. Oberschwingung fließt. Die Strombelastung ist also höher als jene in den einzelnen Außenleitern (Phasen). Die Überlastung des PEN- oder N-Leiters besteht auch bei symmetrischer Belastung des Drehstromsystems. Mit dem zunehmenden Einsatz nichtlinearer Verbraucher ist eine zunehmende Brandgefahr verbunden.

7 Biegeradius

In der Installationspraxis werden Leitungsführungen häufig den örtlichen geometrischen Verhältnissen angepasst. Das führt auch dazu, dass Leitungen mit kleinstem Biegeradius verlegt werden oder gar geknickt werden. Gelegentlich werden auch Schlag- und Druckspuren beobachtet, die auf eine gewaltsame Anformung der Leitung an vorgegebene Schlitze oder Räumlichkeiten hinweisen.

Mit einem zu kleinen Biegeradius ist eine Stauchung der Isolierung auf der konkaven, inneren Seite der Biegung, aber insbesondere eine Streckung der konvexen, also äußeren Seite verbunden. Die Streckung führt zu einer Ausdünnung der Isolationsdicke und begünstigt eine Rissbildung, zum Fließen bei erhöhten Temperaturen und somit zu Spannungsdurchschlägen. Die Verformung oder Reckung des Leitermaterials kann auch zu lokalen Widerstandserhöhungen im Leiter selbst und so zu einer lokalen Übererwärmung

führen. Solche Spuren überdauern häufig das Brandgeschehen und verbleiben als Beweismittel.

Zu dem Thema Biegeradien ist auf DIN VDE 0100-520, DIN VDE 0298-1, DIN VDE 0298-3 und DIN VDE 0298-300 zu verweisen; dort werden Anforderungen an die minimalen Biegeradien aufgeführt. Für viele Anwendungsfälle werden bei querschnittschwachen Mantelleitungen Mindest-Biegeradien von 3- bis 4-fachem Außendurchmesser genannt. Mit zunehmendem Außendurchmesser nehmen die Mindestbiegeradien natürlich zu. Die Verlege- und Beanspruchungsart ist ebenfalls zu beachten.

Beim Biegen muss auch die Arbeitstemperatur berücksichtigt werden, weil niedrige Temperaturen zu einer Versprödung der Isolierung führen und zu hohen Temperaturen mechanische Beschädigungen begünstigen.

Besonders kritisch erscheinen die Stegleitungen, die nach den Normen nicht auf brennbaren Materialien verlegt werden dürfen. In der Praxis werden diese Leitungen häufig durch Umklappen einem rechtwinkligen Verlauf angepasst, ohne zu berücksichtigen, dass die Isolierung zwangsläufig beschädigt und der Leiterquerschnitt verändert wird. Stegleitungen besitzen zudem eben nur eine einzige Isolierung (Betriebsisolierung); die äußere verformbare Umhüllung stellt nämlich keine Schutzisolierung dar.

8 Tierfraß

Auf Tierfraß wird in Abschnitt 4.1.6 separat eingegangen, da er eine eigenständige mittelbare Brandursache darstellt.

Tierfraß führt zur Beschädigung der weichen Leitungsisolierungen. Hier ist nicht nur an Mäuse- und Rattenfraß zu denken, sondern an alle Tiere, deren Zähne und Beißkraft einen mechanischen Schaden an der Isolierung herbeiführen können. Dazu zählen natürlich auch die Haustiere und der Marder im Kfz-Motorraum. Auch die Larve des Hausbocks (Holzwurm) kann Fraßschäden verursachen.

Der Nachweis der Fraßspuren ist meist nicht zu führen, da ein auf diese Weise gezündeter Brand die Spuren in der Regel vollständig beseitigt. Es gelingt aber durchaus, in der Peripherie entsprechende Fraßspuren nachzuweisen, sei es an benachbartem Leitungsmaterial oder an anderen Gegenständen (Papier, Nüsse). Auch tiertypischer Kot in Hohlräumen oder aufgestellte mechanische und Köderfallen können als Hinweis dienen.

Die Fraßschäden können häufig nicht identifiziert werden, so dass andere Schadensursachen angenommen werden. Durch Fraß kann zum Beispiel das Auftreten von Fehlerströmen begünstigt werden oder die Durchschlagfestigkeit der Isolierung herabgesetzt werden.

Der Tierfraß kann aber auch zu einem spontanen Lichtbogenüberschlag führen, so dass die Verursacher und die ursprünglich vorhandenen, tiertypischen Fraßspuren zwangsläufig zerstört werden. Der Zündung eines Lichtbogens gehen häufig eskalierende Fehlerströme voraus, so dass die Brandzündung mit erheblicher Zeitverzögerung auftritt.

9 Arbeiten an Leitungen

Mechanische Belastungen führen zu einer Deformation der Isolierung und der Leiter und erzwingen eine Reduzierung der Isolierfähigkeit und eine Schädigung der Leitungsadern und deren Querschnitte. Die Belastung kann durch Torsion, Druck, Zug oder Schlag erfolgen; aber auch beim Einziehen in Rohre oder Durchführungen können schwere Schäden herbeigeführt werden. Die Schäden sind überwiegend latent und wirken sich mit erheblicher Zeitverzögerung aus. Je höher die Arbeitstemperatur, desto leichter wird ein Schaden an der thermoplastischen Isolierung eintreten; bei tiefen Temperaturen ist mit einer Versprödung und Rissbildung zu rechnen.

Die Schäden werden schon häufig bei der Errichtung des elektrotechnischen Gewerkes herbeigeführt. Sie müssen dabei nicht offenkundig sein, weshalb der sachgerechten Errichtung und der erforderlichen Besichtigung, Erprobung und Messung eine besonders hohe Bedeutung zukommt. Aber auch Wartungs- und Reparaturmaßnahmen führen zu erheblichen Schäden, wenn unter besonderes beengten oder ungünstigen Umständen gearbeitet werden muss. Die Latenz der Schäden wird begünstigt, wenn nach der Errichtung oder Reparatur andere Bauteile (Verputz, Rohre, Dosendeckel, Abdeckungen, Gehäuse) den Arbeitsort der weiteren visuellen Kontrolle entziehen.

Bei der heutigen Dichte von Versorgungssystemen beinhalten auch nicht-elektrische Maßnahmen eine Gefährdung der elektrischen Betriebsmittel. So können Schweißarbeiten zu einer großvolumigen Gefährdung der Isolierung in teilweise nicht kontrollierbaren Bereichen führen. Auch Lötungen können wegen der Wärmeleitung in der Kupferader Schäden in entfernteren Bereichen verursachen. Auf die Schäden durch Anbohren von elektrischen Leitungen im Verputz ist besonders hinzuweisen.

10 Verschmutzungen, Wasserzutritt

Im Laufe der Betriebsjahre tritt in elektrischen Anlagen eine Verschmutzung auf, die häufig nicht beseitigt wird, weil wegen des vermeintlich ungestörten Betriebs keine Notwendigkeit erkannt wird. In Verbindung mit kondensiertem Wasser (Unterschreiten des Taupunktes) und/oder anderen leitfähigkeitserhöhenden Substanzen wird die Qualität der Isolierstrecke so beeinträchtigt, dass zwangsläufig Kriechströme auftreten, die zu einer sukzessiven Schädigung der Isolierstrecke (Kriechstromstrecke) führen. So können brandgefährliche Kriechströme fließen oder sogar Lichtbögen (siehe Punkt 4.3.6.2.3: 1.) gezündet werden.

Starke Verschmutzungen können auch zu einem Wärmestau führen, so dass die Auslegungstemperatur des elektrischen Betriebsmittels überschritten wird. Im Falle der Verdämmung von Leitungen und wärmeerzeugenden Betriebsmitteln kann somit auch ein Glimmbrand an aufliegenden brennbaren Stäuben gezündet werden, da deren Glimmtemperaturen relativ niedrig liegen (siehe Punkt 4.3.4).

Um elektrische Betriebsmittel sicher zu gestalten und vor schädlichen Umwelteinflüssen dauerhaft zu schützen, müssen Maßnahmen gegen die Einwirkung von Fremdkörpern, vor allem Staub, und Wasser getroffen werden; damit ist auch der Berührungsschutz von spannungsführenden Betriebsmitteln erreichbar.

Zur Erhöhung der Betriebssicherheit sind Schutzarten nach DIN 40050 und DIN EN 60 529 eingeführt worden, die mit

IP XY

bezeichnet werden. Der Buchstabe X steht für den Berührungs- und Fremdkörperschutz und Y steht für den Wasserschutz. Sie haben folgende Bedeutungen:

X = 0	kein Berührungs- und Fremdkörperschutz
X = 1	Schutz gegen große Fremdkörper, > 50,0 mm
X = 2	Schutz gegen mittelgroße Fremdkörper, > 12,0 mm
X = 3	Schutz gegen kleine Fremdkörper, > 2,5 mm
X = 4	Schutz gegen kornförmige Fremdkörper, > 1,0 mm
X = 5	Schutz gegen Staubablagerung (staubgeschützt)
X = 6	Schutz gegen Staubeintritt (Staubdicht)

Y = 0	kein Wasserschutz
Y = 1	Schutz gegen senkrechtes fallendes Tropfwasser
Y = 2	Schutz gegen schrägfallendes Wasser
Y = 3	Schutz gegen Sprühwasser
Y = 4	Schutz gegen Spritzwasser
Y = 5	Schutz gegen Strahlwasser
Y = 6	Schutz bei Überflutung
Y = 7	Schutz beim Eintauchen in Wasser
Y = 8	Schutz beim Untertauchen unter andauerndem Druck

In einer Werkstätte, wo Staub anfällt und eine mechanische Beanspruchung zu erwarten oder in Bereichen, wo Feuchtigkeit anzutreffen ist, wird also eine spritzwassergeschützte Ausführung der Betriebsmittel nach IP 54 einzusetzen sein.

IP 44 bedeutet also Schutz vor Berührung mit Werkzeugen, Drähten o. ä. und gegen das Eindringen fester Fremdkörper mit einem Durchmesser > 1 mm sowie der Schutz gegen Spritzwasser aus allen Richtungen (Beispiel: Bad, Sanitärbereich).

An Stelle der IP-Kennzeichnung werden auch insbesondere auf dem Installationsmaterial Kennzeichnungen mit verschiedensten Symbolen anzutreffen sein. Als Beispiele seien hier angeführt:

Symbol	Bedeutung	IP-Schutz
1 Tropfen	tropfwassergeschützt	IP x1
1 Tropfen im Rechteck	regengeschützt	IP x3
1 Tropfen im Dreieck	spritzwassergeschützt	IP x4
2 Dreiecke mit Tropfen	strahlwassergeschützt	IP x5
2 Tropfen	wasserdicht	IP x7
2 Tropfen ...bar	druckwasserdicht	IP x8
Gitter	staubgeschützt	IP 5y
Gitter umrandet	staubdicht	IP 6y

4.3.6.2.2 Wirkung von Fehlerströmen

Verlässt Strom die vorbestimmten Leitungswege, so wird dieser Anteil als Fehlerstrom bezeichnet. Dies kann in Verteilungsanlagen wie in Verbraucheranlagen, in starren wie in flexiblen Leitungen als auch in allen elektrischen Verbrauchern erfolgen. Mit der Abnahme des Isoliervermögens R_{iso} der Isolation (also Reduzierung des Isolationswiderstandes) nimmt der Fehlerstrom I_F nach dem Ohm'schen Gesetz

$$I_F = U R_{iso}^{-1} \quad (V \Omega^{-1} = A)$$

naturgemäß zu. Die Isolierstoffe müssen daher einen solchen Isolationswiderstand gewährleisten, dass der Fehlerstrom minimal bleibt und keine schädigenden Nebenwirkungen verursacht werden.

Jede Reduzierung des Isolationswiderstandes kann zu Beginn eines Schadensablaufes zu zunächst unbemerkten Kriechströmen führen, die sich aber schädigend für den Isolierweg auswirken. Dabei entstehen schmale Pfade geringer Leitfähigkeit, auf denen begrenzte Ströme nicht bestimmungsgemäß, also fehlerhaft fließen. In Abschnitt 4.3.6.2.1 sind die verschiedenen Mechanismen der Isolationsschädigung diskutiert.

Diese Fehlerströme wirken selbst progressiv schädigend. Sie können zu lokalen Entladungen und Lichtbogen-Überschlägen führen, die bleibende mikroskopische Schäden verursachen. Solche sind Kohlenstoffinseln; diese sind als Leitfähigkeitsinseln wirksam und reduzieren somit den Übergangswiderstand und die Durchschlagsfestigkeit jeder Trenn- oder Isolierstrecke.

Wird ein solcher fehlerhafter Übergang durch die Einwirkung von Feuchtigkeit gefördert, so wird durch Verdampfen dieser leitfähigen Schicht zwar wieder ein erhöhter Widerstand der Fehlerstrecke erreicht, aber wegen der dabei entstandenen Schädigung bei Wiederbefeuchtung ein erhöhter Fehlerstrom fließen. Mit zunehmender Betriebszeit wird so ein eskalierender Mangel herbeigeführt, der zur sukzessiven und gefährlichen Erhöhung des Fehlerstromes I_F führt. Der Betrieb von elektrischen Verbrauchern bleibt dabei

ungestört, so dass sich der Fehlerstrom durch abnehmenden Widerstand an der Fehlerstelle unbemerkt entwickeln bzw. erhöhen kann.

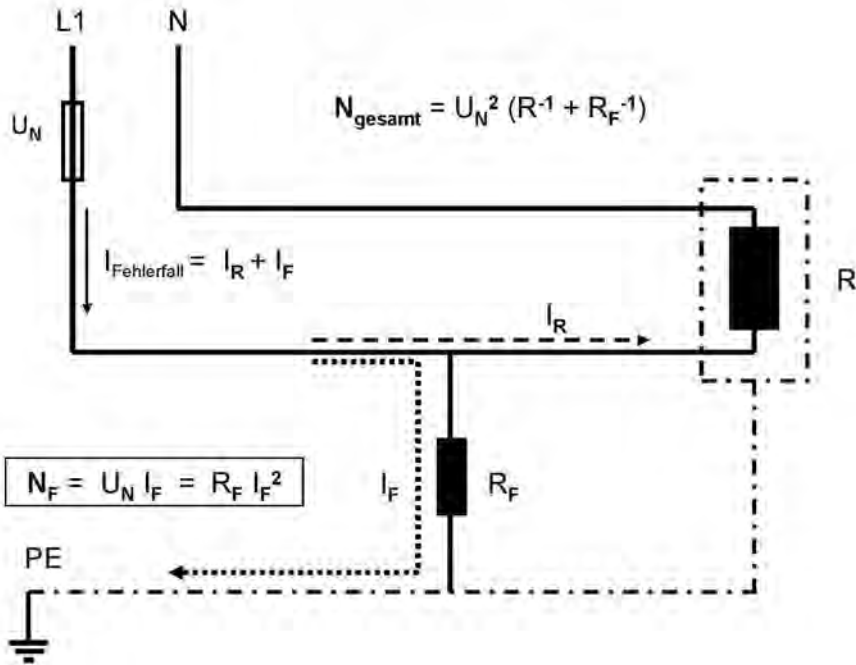


Abb. 17: Isolationsmangel R_F und dort sich entwickelnder Fehlerstrom I_F

Der Fehlerstrom I_F kann so hoch werden, dass die an der Fehlerstelle umgesetzte Fehlerleistung N_F das im Strompfad befindliche oder benachbarte brennbare Material zur Entzündung bringen kann. In elektronischen Geräten zeichnet sich der Weg des Fehlerstroms als deutlicher Pyrolyseschaden auf der Oberfläche der isolierenden Platine ab, wenn ein Frühschaden begutachtet wird.

Die bestimmende Größe des Fehlerstroms ist der Widerstand R_F an der Fehlerstelle, genannt Fehlerwiderstand. Im ungestörten Normalfall ist dieser Widerstand extrem hoch, aber nie unendlich groß und wird als Isolationswiderstand bezeichnet.

Unterstellt man zum Beispiel, dass ein Leistungsumsatz an der Fehlerstelle von ≥ 40 W immer brandgefährlich ist, so muss der Fehlerstrom bei einer Netzspannung von 230 V auf 174 mA beschränkt bleiben, wie später noch ausführlicher dargelegt wird. Der Widerstand R_F an der Fehlerstelle dürfte also 1.322Ω keinesfalls unterschreiten, damit die kritische Fehlerleistung nicht umgesetzt wird. Fehler- oder Leckströme sind grundsätzlich nicht zu vermeiden, sie müssen nur hinreichend minimiert werden, indem der Isolationswiderstand zwischen Leitern mit unterschiedlichem Potential möglichst hoch ist und so auch bleibt. Dies gilt für den Sach- wie Personenschutz.

Ist im 230-Volt-Netz der geforderte Isolationswiderstand von $\geq 500 \Omega/V$ realisiert und wird ein Spannungsabfall in der Netzversorgung von 2 Volt angenommen, so würde bei einer „Fehler“-Spannung von $U_F = 228$ Volt ein Stromfluss über die Isolierung zur Erde abfließen können; der über die Isolierung fließende -unbedeutende- Ableitstrom I_F ergibt sich zu

$$I_F = U_F (500 \cdot 228)^{-1} = 0,002 \text{ (A)} = 2 \text{ (mA)}$$

und die Fehlerleistung N_F beträgt nur

$$N_F = 228 \cdot 0,002 = 0,456 \text{ (W)}$$

Dieser Wert ist unbedenklich, da diese Leistung weit unterhalb der kritischen Leistung liegt.

Nimmt an der Fehlerstelle der Isolationswiderstand der Isolierung einer Leitung aber infolge sukzessiver Schädigung ab, so nehmen zwangsläufig der Fehlerstrom I_F und die Fehlerleistung N_F zu. Erreicht die Fehlerleistung den kritischen Wert, dann ist die Brandgefahr begründet.

Als kritische Fehlerleistung wird, wie vorgenannt, ein Wert von etwa ≥ 40 Watt angesetzt. Für Sicherheitsbelange wird gelegentlich ein Wert von 20 Watt angesetzt. Bei einer beispielhaften Fehlerspannung U_F von, wie oben angesetzt, 228 V wäre somit ein grenzwertiger Fehlerstrom $I_{F,\text{grenz}}$ zu errechnen

$$I_{F,\text{grenz}} \leq N_F / U_F = 0,175 \text{ (A)}$$

Im Fall der niedrigeren kritischen Fehlerleistung von 20 W beträgt der grenzwertige Fehlerstrom sogar nur noch 88 mA.

Gelegentlich wird in der Literatur mit einem vollkommenen Kurz- oder Erdschluss argumentiert. Das wäre gleichbedeutend mit einem theoretischen Fehlerwiderstand von $R_F = 0 \Omega$. Die Fehlerleistung N_F würde sich damit formal wie folgt errechnen lassen:

$$N_F = U_F \cdot I_F = R_F \cdot I_F^2 = 0$$

Das Ergebnis zeigt, dass dieser Ansatz mit $R_F = 0 \Omega$ falsch ist, weil nur eine endliche Fehlerleistung einen Brand zünden kann. Es gibt einen realen Widerstandswert $R_F \neq 0 \Omega$, der vom Idealzustand $R_F \approx \infty \Omega$ entfernt ist und sukzessive absinkt und bei Schädigung nie Null wird, sondern einen endlichen niedrigen Wert erreicht. Nach den Sicherheitsbestimmungen sollen die Überstromschutzeinrichtungen außerdem schon bei endlichen Werten des Isolationswiderstandes eine Abschaltung der Spannung bewirken.

Wesentlich dabei ist, dass die Fehlerleistung in einer lokal begrenzten Zone umgesetzt wird, so dass eine entsprechende Leistungsdichte erreicht wird. Wird allerdings ein Lichtbogen gezündet, dann steht die gesamte Lichtbogenleistung innerhalb der Überschlagsstrecke zur Verfügung, so dass schon eine Annäherung von Brennbarem einen Zünderfolg

liefert. Der Fehlerstrom kann sich also brandzündend auswirken, indem er lokal entweder zu einer Joule'schen Erwärmung führt oder auch einen Lichtbogen zündet.

Zur Verdeutlichung werden diese Zusammenhänge an einem Beispiel in einer 230-Volt-Verbrauchsanlage demonstriert. Dabei wird angenommen, dass der Netzwidestand R_N , also die Summe der Widerstände von Transformator, allen Leitungen und Übergängen bis zum Hausanschluss nur $R_N = 2 \text{ Ohm}$ betragen soll. Der Kurzschlussstrom beträgt in diesem Beispiel also 115 A.

Der Fehlerstrom I_F kann bei einer Netzspannung U_N , bei einem gesamten Netzzinnenwiderstand R_N in Abhängigkeit des Fehlerwiderstandes R_F berechnet werden nach

$$I_F = U_N / (R_F + R_N)$$

Für den Fehlerstrom ergibt sich daher in Abhängigkeit des Fehlerwiderstandes ein im folgenden Diagramm dargestelltes Verhalten. Anfangs ist der Widerstand R_F sehr hoch und nimmt mit zunehmender Schädigung ab. Man erkennt, dass mit zunehmendem Fehler, also mit abnehmendem Fehlerwiderstand, der Fehlerstrom deutlich zunimmt und schließlich einen maximalen Wert erreicht, der dem so genannten Kurzschlussstrom entspricht, der sich aus dem Innenwiderstand des betroffenen Stromkreises ableitet.

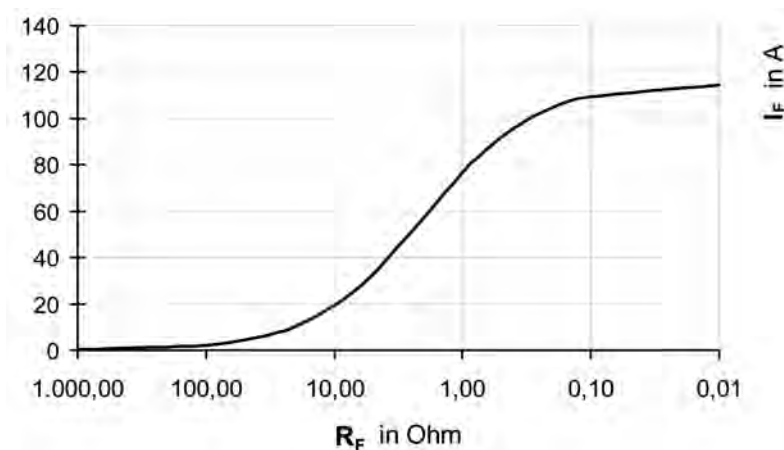


Abb. 18: Fehlerstromentwicklung bei abnehmendem Fehlerwiderstand (Beispiel, Daten s. Text)

Die an der Fehlerstelle umgesetzte Fehlerleistung N_F ist ebenso einfach wie folgt zu berechnen:

$$N_F = R_F \cdot I_F^2 = U_N^2 \cdot R_F \cdot (R_F + R_N)^{-2}$$

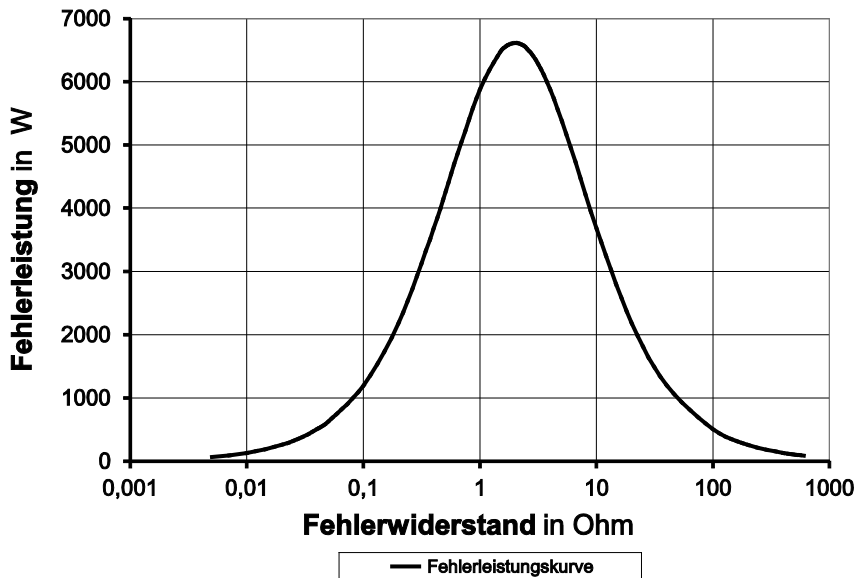


Abb. 19: Entwicklung der Fehlerleistung in Abhängigkeit vom Fehlerwiderstand (Beispiel, Daten s. Text)

Bei gleichen Grunddaten erkennt man ein Leistungsmaximum bei $R_F = 2$ Ohm. Das überrascht nicht, weil die Differentiation der Fehlerleistung nach dem Fehlerwiderstand R_F die maximale Leistungsaufnahme bei

$$R_F = R_N$$

ergibt. Dieses Ergebnis ist als Leistungsanpassung in der Elektrotechnik bekannt.

4.3.6.2.3 Spezielle brandursächliche Formen der Stromwirkung

1 Lichtbogen

Ein Lichtbogen ist eine sich selbst erhaltende Gasentladung zwischen Elektroden unterschiedlichen Potentials. So befinden sich der Außenleiter (Phase) und Neutraleiter (N-Leiter) bzw. Schutzleiter (PE-Leiter) oder Erde auf entsprechend unterschiedlichem Potential, so dass die Voraussetzungen für eine Entladung via Lichtbogen gegeben sind. Ähnliches gilt für Gleichspannungsdifferenzen. Lichtbögen treten im technischen Bereich auch gewollt auf, wie z. B. in der Bogenlampe, in Quecksilberhochdrucklampen, beim elektrischen Schweißen oder auch, aber unvermeidlich, in Trennstrecken (Schalter).

Bei unterschiedlichen Spannungen bildet sich ein elektrisches Feld aus, das mit der Feldstärke (Spannung/Abstand) beschrieben wird. Wenn wegen einer lokal hohen Feldstärke die Durchschlagfestigkeit der Isolierung oder der Trennstrecke oder der Luft erreicht wird, kann ein Lichtbogenüberschlag gezündet werden. Im Lichtbogen bildet sich

nämlich ein Plasma, so dass die Luftstrecke leitfähig wird. Der Lichtbogen kann zunächst mikroskopisch klein sein, wie bereits bei der Betrachtung des Entstehens des Fehlerstroms besprochen, und nur lokale Schäden verursachen, die aber die Ausbildung eines Lichtbogens über die ganze Trennstrecke begünstigen. An den Fußpunkten des Lichtbogens und gelegentlich auch auf der Trennstrecke entstehen deutliche Verkohlungs- oder Schmelzspuren.

Der Lichtbogen besitzt einen inneren Widerstand, der zu einer Erhöhung des Schleifenwiderstandes (Innenwiderstands) des betroffenen Stromkreises führt, was eine Begrenzung des Kurzschlussstromes im betroffenen Stromkreis bedeutet. Dadurch kann die Abschaltung des lichtbogenbetroffenen AC-Stromkreises durch das vorgeschaltete Überstromschutzorgan verzögert oder sogar verhindert werden. Damit ist eine erhöhte Brandgefahr impliziert, weil nicht nur die hohe Temperatur des Lichtbogens vorhanden ist, sondern auch die Einwirkungsdauer verlängert wird. Da die Fehlerleistung N_F über eine längere Zeit Δt zur Verfügung steht, erhöht sich der Energieumsatz an der Fehlerstelle [$N_F \Delta t$ in Ws bzw. J] und damit das Zerstörungspotential an der Fehlerstelle.

Eine besondere Problematik liegt bei den Solaranlagen zur Stromgewinnung (Photovoltaik-Anlagen, PV-Anlagen) vor, die unter dem Aspekt alternativer Energieerzeugung eine rasante Verbreitung erfahren. In den Solarzellen erfolgt eine Umwandlung der Strahlungsleistung der Sonne in elektrische Energie. Die Leistung der PV-Anlage wird in kWp (Kilowatt Peak) angegeben, die in der Praxis nicht erreicht wird, weil diese Werte nur unter Normbedingungen zu erzielen sind.

Der DC-Lasttrennschalter trennt die PV-Anlage nur vom Wechselrichter. Im Fall eines Isolationsschadens im DC-Bereich kann somit ein gefährlicher DC-Lichtbogen gezündet werden, der eben nicht durch Überstromschutzorgane abschaltbar ist. Die bei Lichteinfall (Sonne, diffuses Licht, Leuchten) vorhandene DC-Spannung von bis zu 900 V stellt zudem eine Gefährdung der Löschkkräfte dar. Nur durch konsequentes Abdecken wäre eine Spannungsreduzierung zur Gefahrenabwehr möglich.

Wird auf der DC-Seite eine DC-Leitung aufgetrennt, kann ein Lichtbogen entstehen. Durch Leitungsunterbrechungen können Brände gezündet werden. Bei brandbeschädigten Leitungen besteht immer die Gefahr der direkten Berührung der beiden Gleichstromleitungen und der Spannungsverschleppung. Auf die Gefahrengrenze des Personenschutzes von 120 V ist hinzuweisen. Gelegentlich stellen die Einsatzleiter auf Grund der Gefährdung der Einsatzkräfte durch Strom und mangelnde Fixierung der DC-Anlagenteile die Brandbekämpfung von PV-bestückten Gebäuden ein.

Innerhalb des Lichtbogens herrschen einige Tausend Grad. Es können Temperaturen über 4.000 °C erreicht werden. Der Energieinhalt reicht von Milli-Joule bis Mega-Joule. Die Stabilität des Lichtbogens hängt von den Verhältnissen an der Durchschlagstelle und dem inneren Widerstand des gesamten Stromkreises ab. Bei elektrischer Anpassung des Lichtbogens an die Versorgungsanlage kann der Lichtbogen stabil brennen, bis die geometrischen Verhältnisse seine Löschung erzwingen. Wegen der hohen Temperatur des Lichtbogens und seiner unter Umständen sehr langen Lebensdauer ist es naheliegend, dass er sehr leicht brandzündend wirken kann, wenn sich in seiner Umgebung brennbares Material befindet.

Der Spannungsabfall im Lichtbogen U_{LB} kann nach einer einfachen Faustformel abgeschätzt werden, wenn ein Fußpunktspannungsfall von 20 V und ein lichtbogenspezifischer Spannungsfall mit $U' = 15 \text{ V cm}^{-1}$ bzw. $U' = 20 \text{ V cm}^{-1}$ angesetzt werden

$$U_{LB} = 20 + U' \cdot l$$

wobei l die Länge des Lichtbogens ist. Unterstellt man also z. B. einen Lichtbogen von 70 V (hierzu $l = 2,5 \text{ cm}$) und einen Schleifenwiderstand von $R_i = 2 \text{ Ohm}$, so ergäbe sich bei einer Netzspannung von $U_N = 230 \text{ Volt}$ ein Fehlerstrom von nur

$$I_F = (20 + U' \cdot l) R_{LB}^{-1} = (U_N - U_{LB}) R_i^{-1} = 80 \text{ A.}$$

Die Fehlerleistung am Ort des Lichtbogens wäre also bei einer Lichtbogen­spannung von 70 Volt 5.600 Watt. Innerhalb einer Einwirkungszeit von 0,5 Stunden würde ein Energie­betrag von 2,8 kWh zur Verfügung stehen. Zum Vergleich: Diese Energie entspricht der Arbeit, die man beim Anheben eines Gegenstandes mit einer Masse von 1.000 kg um 1 km verrichten würde. Aus der Praxis ist bekannt, dass Lichtbogenenergien von $> 250 \text{ kWh}$ ($> 0,07 \text{ kWh}$) zu Totalzerstörungen von Schaltanlagen und zu Personenschäden führen.

Wenn eine Anpassung des Lichtbogen-Innenwiderstandes an den Netzzinnenwiderstand (Schleifenwiderstand) vorläge, was bei obigem Beispiel ($U_{LB} = 70 \text{ V}$) bei $R_N = 0,875 \text{ } \Omega$ der Fall wäre, dann könnte der Lichtbogen sehr lange Zeit stabil brennen und somit eine extreme Brandgefahr hervorrufen. Meistens vergrößert sich die Lichtbogenstrecke durch die Wirkung des Lichtbogens selbst, so dass der Spannungsabfall und der Innenwiderstand vergrößert werden und der Lichtbogen abreißt.

Eine wirksame Möglichkeit zur Reduzierung der Gefahr besteht in der zeitlichen Begrenzung der Lichtbogeneinwirkung durch Abschaltung mit Überstromschutz­einrichtungen, deren Schutzwirkung in Abschnitt 4.3.6.3 besprochen wird.

Zu erwähnen ist noch der sich rasch einstellende Druckaufbau, der zu weiteren Folgeschäden führen kann. Drücke im Bereich von 10^4 Pa ($= 0,1 \text{ kg cm}^{-2}$) bis zu 10^5 Pa ($= 1 \text{ kg cm}^{-2}$) weisen auf das hohe Schadenspotential hin. Entsprechende Schäden finden sich z. B. in Schaltanlagen.

2 Schmelzspuren, Schmelzperlen

Wird das Kupfer-Leitungsmaterial auf 1.084° C erhitzt, dann schmilzt es, wobei das verflüssigte Kupfer abtropfen kann. Die zurückbleibenden festen Schmelzerscheinungen überdauern die meisten Brände und sind für die Erforschung der Brandursache von größter Bedeutung. Leitungen aus Aluminium, die vom Kupfer eindeutig verdrängt wurden, schmelzen schon bei 660° C , weshalb deren Schmelzspuren vom Brand vernichtet werden.

Lokale Schmelzungen treten gerade bei der Einwirkung eines Lichtbogens auf. Hier wird in den Fußpunkten des Lichtbogens das Leitungsmaterial erschmolzen, wodurch charakteristische, lokal begrenzte Schmelzspuren entstehen. Im Einwirkungsbereich können

erschmolzene Bereiche als Schmelzperlen abtropfen oder durch die auftretenden Kräfte in die Umgebung geschleudert werden, so dass sich der Gefahrenbereich einer Brandzündung erheblich vergrößert.

Diese Schmelzperlen besitzen einen geringen Durchmesser und damit einen geringen masseproportionalen Energieinhalt. Treffen sie auf brennbares Material, sind die Werkstoffeigenschaften dieses Materials ausschlaggebend, ob eine Entzündung erfolgen kann. Es hängt also von den Entzündungseigenschaften des kontaktierten Materials ab, ob eine Brandzündung möglich ist.

Die auf dem Leitungsmaterial zurückbleibenden und den Brand in der Regel morphologisch und topographisch unverändert überdauernden Schmelzspuren werden als Lichtbogenspuren, aber auch umgangssprachlich als „Kurzschluss Spuren“ bezeichnet. Sie sind sehr charakteristisch und zeichnen sich in der Regel durch eine scharfe Abgrenzung gegenüber dem übrigen Leitermaterial ab, die das Auffinden durch taktile oder visuelle Prüfung möglich macht. Gelegentlich sind die Spuren aber weniger ausgeprägt, so dass eine Untersuchung mittels Lupe, Stereolupe oder gar Rasterelektronenmikroskop empfehlenswert erscheint. Die fotografische Dokumentation der Spuren macht die Bewertung durch Dritte nachvollziehbar.

Weist die Schmelzspur gegenüber dem Basismaterial des Leiters eine abweichende Farbe auf, ist eine Materialidentifizierung erforderlich. So kann ein Kontakt mit Zink zu einer Legierungsbildung (Verzinkung) führen, wobei eine niedrig schmelzende Legierung (Messing) entsteht. Eine solche nur thermisch bedingte Schmelzspur kann gelegentlich nicht von einer Fehlerstromspur zuverlässig unterschieden werden, so dass eine Elementanalyse (Röntgenmikroanalyse, Röntgenfluoreszenzanalyse) erforderlich wird. Auf Grund besonderer geometrischer Umstände kann auch eine lokale Überhitzung zu einer Schmelzspur führen, die aber bei hinreichender Erfahrung von Spurenbildern als thermisch erzeugt erkannt werden kann. Tropfenbildung und Verschmelzungen mehrerer Leitungsadern sprechen sehr wahrscheinlich für einen nur thermisch bedingten Folgeschaden am Leitungsmaterial, der keinesfalls brandursächlich gewesen sein kann.

Bei diesen konkurrierenden Entstehungsprozessen von Schmelzspuren ist zu beachten, dass die thermisch bedingten Brandfolgespuren ursprünglich vorhandene Fehlerstromspuren maskieren können. Es ist deshalb unter Umständen eine vollständige Untersuchung des Stromkreises bezüglich anderer Spuren und bezüglich des Brandumfeldes erforderlich, um solche Schäden richtig einzuordnen. Hier ist eine große Erfahrung von besonderem Nutzen.

Das Volumen der vom Lichtbogen erzeugten Spur gibt keine Auskunft über den im Lichtbogen geflossenen Strom und hängt auch nicht vom Nennstrom der vorgeschalteten Sicherung ab. Nur die physikalischen Parameter der vom Durchschlag betroffenen Materialien, die Durchschlagstrecke und die elektrischen Parameter der Stromversorgung bestimmen das Schadensausmaß.

In der Praxis stellt sich die Frage, ob der durch die Lichtbogenspur (Kurzschlussspur) beweisbare Fehlerstromübergang auch tatsächlich brandzündend war oder ob dieser nur als Folge der Schädigung der elektrischen Leitung infolge Brandeinwirkung entstanden

ist. Trotz aller seit Jahrzehnten durchgeführten Bemühungen, auch mit modernsten analytischen Verfahren, ist es nicht gelungen, einen sicheren Beweis der Genese zu führen. Die gelegentlich erreichte Differenzierung gelang nur unter Laborbedingungen, hat aber bei realen Brandschäden versagt. Es ist also festzuhalten, dass es bislang kein verlässliches Verfahren gibt, mit dem beweissicher entschieden werden kann, ob die Fehlerstromspur auf eine Brandzündung oder auf eine Brandfolge hinweist.

In der Literatur wird dieses Problem auch unter dem Begriff primärer oder sekundärer Kurzschluss beschrieben. Unter dem primären Kurzschluss wird also eine Brandzündung durch Fehlerstrom bzw. Lichtbogen verstanden; unter sekundärem Kurzschluss wird entsprechend die Spur bezeichnet, die als Folge der Brandeinwirkung (Zerstörung der Isolierung, Kohlebrücken, Kriechstrecken, leitfähige Dämpfe und Gase) durch einen vom Brand erzwungenen Fehlerstrom bzw. Lichtbogen entstanden ist.

Die isolierte Spur eines Fehlerstromübergangs (Fehlerstromübergangsspur) kann nach dem Spurenbild lediglich einer Lichtbogeneinwirkung zugeschrieben werden, nicht aber nach primärem oder sekundärem Kurzschlussgeschehen unterschieden werden; es ist deshalb immer erforderlich, in die Beurteilung der Lichtbogenspur das gesamte Spurenbild des Brandobjektes mit einzubeziehen.

Es ist daher unzulässig und fehlerhaft, eine mit einer Fehlerstromspur belegte Leitung aus dem Zusammenhang der Spuren herauszulösen. Eine Untersuchung einer solchen isolierten Spur im Labor (Lupe oder Elektronenmikroskop) kann allenfalls ergeben, dass die Schmelzspur als Folge eines Lichtbogens (Kurzschlussspur) entstanden ist; eine Aussage, ob der zugehörige Fehlerstromübergang oder Lichtbogen brandursächlich war, ist nicht möglich. Möglicherweise kann die Aussage getroffen werden, dass eine Brandzündung durch Fehlerstrom nicht ausgeschlossen werden kann, was für die Aufklärung einer Brandursache unbefriedigend ist und so Strom unzulässig als Ursache vorgeschoben wird.

3 Widerstandswärme

Fließt elektrischer Strom durch einen Widerstand, dann wird in diesem als Stromwirkung Joule'sche Wärme erzeugt. In Heizgeräten ist dieser Effekt erwünscht, in Glühlampen ist dieser ein unerwünschter unvermeidlicher Nebeneffekt (siehe Punkt 4.3.4).

Bei Leitungsübergängen, also an Klemmstellen oder bei Querschnittsreduzierungen, tritt wegen des lokal erhöhten Widerstandes ebenso Joule'sche Wärme auf. Bei den dort zu erwartenden Leistungsverlusten von bis zu einem Watt tritt noch keine Gefährdung auf. Da sich aber der Kontaktwiderstand R_K umgekehrt proportional zur Wurzel aus dem Anpressdruck p verhält ($R_K \sim p^{-1/2}$), ist nahe liegend, dass bei unsachgemäßem Anpressdruck rasch ein erheblicher Kontaktwiderstand zu erwarten ist, an dem eine erhöhte Fehlerleistung umgesetzt werden kann. Eine Halbierung des Kontaktdrucks erbringt somit immerhin eine Erhöhung des Kontaktwiderstands und der Fehlerleistung um 40 %.

Aus diesen Gründen ist selbst bei ordnungsgemäßen Leitungsverbindungen in Wanddosen die Zahl der Klemmen begrenzt, weil jede Klemmstelle einen Übergangswiderstand aufweist und Joule'sche Wärme liefert. Dadurch soll die Verlustleistung so begrenzt werden, dass keine übermäßige, schädigende Erwärmung auftritt.

Leistungsverbindungen, die als so genannte Würgeverbindungen oder durch Verdrillen hergestellt werden, sind allenfalls im Niederstrombereich akzeptabel und so zum Beispiel im Fernmeldebereich üblich. Bei Lastströmen sind solche einfachen Leistungsverbindungen völlig ungeeignet; sie tangieren die Problemfelder Übergangswiderstände und Wackelkontakt (s.u.: 8) und zeichnen sich durch Unzuverlässigkeit aus.

Beim Auftauen von eingefrorenen Rohren o.ä. mittels Schweißstrom werden im Stromweg befindliche widerstandsbehaftete Rohrverbindungen unzulässig lokal überhitzt. Dadurch wird eine mittelbare Gefährdung der Umgebung durch Wärmeleitung herbeigeführt. Es kann auch anliegendes brennbares Material, z. B. thermische Isolierungen, entzündet werden. Durch unbeabsichtigtes Verschleppen des Schweißstroms in nicht kontrollierbare Bereiche ist auch an eine Überlastung von schwach dimensionierten Schutzleitern zu denken, welche wegen des Potentialausgleichs häufig eine leitfähige Verbindung mit den schweißstromführenden Rohren aufweisen. So können durchaus Brände durch Auftauen in entfernten Anlagenteilen gezündet werden.

Wenn im Stromweg Isolierstellen vorhanden sind, z. B. Teflonabdichtungen, dann kann der Schweißstrom nicht den vorgesehenen Weg nehmen. Er kann sich ersatzweise einen anderen, niederohmigen Weg suchen, der visuell nicht kontrollierbar ist, weshalb bei kritischen Übergängen in diesem Ersatzweg eine unkontrollierbare Joule'sche Wärme sich entwickelt. Der Ersatzweg kann weit außerhalb des Kontrollbereiches liegen, weshalb dort Überraschungsbrände gezündet werden können. So wurden auf diese Weise sogar Brände in Nachbarobjekten gezündet.

Früher wurden die abisolierten Enden von flexiblen Litzenleitungen häufig durch Verlöten gegen Aufspießen gesichert. Diese Maßnahme sollte allenfalls nur an den Aderspitzen vorgenommen werden. Im Kontaktbereich der Klemmung soll nicht gelötet werden, da sich das Lot durch Kaltfluss auszeichnet und so die Qualität der Verbindung mit der Gebrauchszeit abnimmt (Erhöhung des Kontaktwiderstandes). Technisch einwandfrei und sachgerecht ist dagegen das Aufquetschen einer so genannten Aderendhülse.

Bei Schaltkontakten müssen die Trennflächen und der Trennmechanismus hochwertig ausgeführt werden, weil bei jedem Trennen oder Kontaktprellen unter Last ein Trennlichtbogen entsteht. Wegen der Schädigung der Trennflächen wird bei solchen Trennvorgängen eine Begrenzung der Lebensdauer der Kontakte zu erwarten sein. So werden bei Schütz- oder Relaiskontakten die Zahl der zulässigen Schaltspiele angegeben. Tritt eine Schädigung der Trennkontakte auf, so erhöht sich der Übergangswiderstand beträchtlich, weil die Kontaktfläche wegen der Schädigung der Schaltflächen reduziert und der Übergangswiderstand erhöht wird. Im Extremfall kann es zur Verschweißung der Kontakte kommen, was in Steuerungen schwerwiegende Folgen nach sich ziehen und auch in der Folge zu Brandzündungen führen kann. So können Heizeinrichtungen trotz vermeintlicher Abschaltung in einen unzulässigen Dauerbetrieb überführt werden, wenn die Kontakte des Leistungsschützes verschweißte sind. Solche Kontakte müssen einzeln überprüft werden, aber nicht durch Betätigung, sondern durch Messung und detaillierter Untersuchung im Ausbausezustand.

Während die Joule'sche Wärme in Heizgeräten bestimmungsgemäß eingesetzt wird, kann sie bei fehlerhaften Verbrauchern erhebliche Schäden verursachen. So kann z. B.

ein Körperschluss in einer Heizeinrichtung (z. B. Heizstab) zu einer Reduzierung des Widerstandes im Heizkreis führen, der bei gleich bleibender Netzspannung wegen der erhöhten Stromaufnahme eine drastische Überhitzung herbeiführt. Solche Fälle sind in Kaffeemaschinen, Trockengeräten, Bügeleisen, Warmwasserbereitern, Frittiergeräten u. ä. nicht selten.

Da elektrische Verbraucher nur einen beschränkten Nutzungsgrad aufweisen, muss deren Verlustleistung beachtet werden; diese wird nämlich an die Umgebung abgeführt. So lange die Konvektion, ob natürlich oder mechanisch herbeigeführt, ungestört ist, kann die Verlustwärme des Verbrauchers weggeleitet werden, so dass in diesem keine zusätzliche Erwärmung erzwungen wird. Im Umkehrschluss heißt das, dass bei gestörter Konvektion eine unzulässige Übererwärmung des Betriebsmittels stattfindet und in diesem Temperaturen entstehen, für die das Betriebsmittel nicht ausgelegt ist.

Ein für diesen Fehler typisches Betriebsmittel ist das Fernsehgerät, das in Möbeln betrieben wird. Wird in den vorgesehenen Fächern ein TV-Gerät eingestellt, das das Fachvolumen völlig ausnutzt, so kann die Verlustwärme eben nicht mehr ordnungsgemäß abgeführt werden. Die thermische Einsatzgrenze der Bauteile wird möglicherweise überschritten und das Versagen der temperaturempfindlichen Bauteile provoziert.

Eine ähnliche Situation tritt beim Abdecken der Lüftungsschlitze von Elektro- und Elektronikgeräten auf. Das können Textilien oder Dekorationsgegenstände sein.

Elektrische Verbraucher können durch in der Nähe befindliche Wärmequellen auf unzulässig hohe Temperatur gebracht werden. Die Einsatzgrenzen des Verbrauchers werden vom Hersteller festgelegt, sie gelten als Obergrenzen der Umgebungstemperatur.

Alle diese Verdämmungen werden in ihrer Wirkung verschärft, wenn Staub und anderer Schmutz bereits eine Grundverdämmung herbeigeführt haben. Fehlende Reinigung von Leitungen und Elektrogeräten können so zur Brandzündung führen.

Auch Mehrfachsteckdosen (Tischsteckdosen) und in Reihe geschaltete Mehrfach-Tischsteckdosen werden gelegentlich über die Bemessungsgrenze hinaus strombelastet. Solche Situationen sind in Räumen mit einer zu geringen Ausstattung mit Wandsteckdosen regelmäßig anzutreffen, insbesondere in den Altbauten. Wenn eine Tischsteckdose voll belegt ist und z. B. ein Gesamtstrom von zulässigen 16 A (10 A) über diese fließt, wundert es nicht, dass eine vorgeschaltete, an einer Wandsteckdose angeschlossene Tischsteckdose mit einer Strombegrenzung von nur 10 A auch ohne weitere Verbraucher überlastet ist; werden neben der 16-A-Tischsteckdosenleiste weitere Verbraucher angeschlossen, dann ist der Überlastungsfall erst recht realisiert. Jeder Betrieb von in Reihe betriebener Tischsteckdosen ist bezüglich einer Überlastung sorgfältig zu prüfen. Abgesehen von internen herstellungsbedingten Mängeln kommt es beim Abdecken oder Überdecken von belasteten Steckdosen zu einer erheblichen Behinderung der Wärmeabfuhr, so dass Mängel gefährlich eskalieren können.

4 Überlastung von Leitungsadern

Bei der Auslegung der Leitungsquerschnitte ist stets darauf zu achten, dass der im Leiter fließende Strom nicht zu einer solchen Erwärmung führt, dass das Isoliermaterial dauer-

haften Schaden nimmt. Als Grenztemperaturen werden bei Dauerbelastung für Gummiisolierungen 60 °C und für PVC-Isolierungen 70 °C angegeben.

Um die Überlastung der Leitungen zu verhindern, müssen Überstromschutzorgane den kritischen Stromfluss so rechtzeitig abschalten, dass es nicht zu einer Überschreitung der Grenztemperaturen des Isoliermaterials kommt. Die genannten Grenztemperaturen gelten somit bei allen Betriebsbedingungen. Es handelt sich um einen Schutz gegen Überlast und damit um eine brandpräventive Maßnahme.

Im Kurzschlussfall treten sehr hohe Ströme auf, die ebenfalls eine gefährliche Übertemperatur im Leiter erzeugen können. Auch dieser Schadensfall muss durch Überstromschutzorgane rechtzeitig aufgefangen werden, wie später dargestellt wird (siehe Punkt 5.).

Es ist daher bei der Planung und Errichtung einer Stromverbrauchsanlage darauf zu achten, dass der Schutz bei Überlast (und Kurzschluss) durch sachgerechte Anpassung von Leitungsquerschnitt und vorgeschaltetem Überstromschutzorgan gewährleistet ist. Auch an das Leistungsvermögen der Überstromschutzorgane werden erhebliche Forderungen gerichtet. Die entsprechenden Normen sind umfangreich und kompliziert, weil sie alle Betriebsbedingungen zu berücksichtigen haben.

Überbrückt man Schmelzsicherungen oder andere Überstromschutzorgane, dann werden sie ihrer Schutzfunktion beraubt und der Stromfluss kann nicht mehr ordnungsgemäß begrenzt werden. Damit ist der Schutz gegen Überlast (und Kurzschluss) zerstört und es können erhebliche Schäden eintreten, die letztlich auch das Brandrisiko und die Gefahr eines Stromunfalls einschließen. Die Überbrückung erfolgt aus der Not fehlender Ersatzsicherungen oder als bewusste Sparmaßnahme. Deshalb sind bei der Untersuchung der Elektrik die Sicherungen stets auszubauen und auf Überbrückungsmaßnahmen zu untersuchen.

Um Stromunfälle zu verhindern, sind in DIN VDE 0100-410:2007-06 neue Errichtungsbestimmungen für Niederspannungsanlagen erlassen, in denen die Schutzmaßnahmen und der Schutz gegen elektrischen Schlag behandelt sind. Jeglicher Personenschutz stellt auch einen Sachschutz dar.

5 Kurzschluss

Unter Kurzschluss versteht man die fehlerhafte Verbindung von Außenleiter L1 und Neutralleiter N im 230-Volt-System bzw. von den Außenleitern L1, L2 und L3 zum Neutralleiter N oder untereinander im 400-Volt-System (Drehstromsystem). Im Drehstromsystem gibt es daher den ein-, zwei- und allpoligen Kurzschluss. Das bedeutet, dass sich im Stromkreis nur die Widerstände des Transformators und der Leitungen bis zur Fehlerstelle (Kurzschlussstelle) befinden. Der dabei zu erwartende Kurzschlussstrom ist wegen des anzustrebenden geringen Innenwiderstandes des Stromkreises so hoch, dass er die stromdurchflossenen elektrischen Betriebsmittel zerstören kann; es sind daher unbedingt strombegrenzende Überstromschutzorgane (Sicherungen) in den Stromkreis einzufügen, um eine frühzeitige (unverzögerte) Unterbrechung des geschädigten Stromkreises herbeizuführen, bevor bleibende Schäden entstehen oder sogar ein Brand gezündet wird.

Um vor diesem Kurzschluss-Überstrom sicher schützen zu können, muss bei der Auswahl, Planung und Errichtung von Leitungsanlagen einiges beachtet werden. Hierzu gibt es umfangreiche VDE-Bestimmungen und Normen. Der Schutz bei Kurzschluss besteht darin, Schutzeinrichtungen vorzusehen, die die Kurzschlussströme in den Leitern eines Stromkreises unterbrechen, bevor sie eine für die Leiterisolierung, die Anschluss- und Verbindungsstellen sowie die Umgebung der Kabel und Leitungen schädliche Erwärmung hervorrufen können.

Im Kurzschlussfall dürfen in Leitungen mit PVC-Isolierung aber durchaus kurzfristig Temperaturen bis zu 160 °C (Gummiisolierung: 200 °C) entstehen (DIN VDE 0298-4). Ist diese Begrenzung wirksam, sind nicht nur die Isolierungen, sondern auch Klemm- und Lötverbindungen ausreichend geschützt. Auch im Überlastfall, der unter 4.3.6.3 besprochen wird, sind erhebliche Übertemperaturen zu erwarten. Bei diesen Grenzfällen der Belastung durch Kurzschluss (oder Überlast) darf die Leitungsisolierung nach den Normen nicht versagen. Werden die in den Normen genannten Grenzfälle durch geeignete Schutzmaßnahmen (Überstromschutzorgane) nicht sicher beherrscht, sind bleibende thermische Schäden an der Isolierung vorbestimmt oder sogar Brandzündungen zu erwarten.

In der Praxis ist der widerstandsfreie Kurzschluss ($R_F = 0$), also der ideale Kurzschluss, eine Fiktion oder ein Idealfehler. Er kann nur bei einer Falschmontage der Leitungen, also bei einer Falschklemmung, herbeigeführt werden. Denkbar wäre auch ein schwerer Havarieschaden. Dieser Fall des nahezu idealen Kurzschlusses ist beherrschbar, wenn die Abschaltung schon beim ersten Auflegen der Spannung auf diesen Stromkreis bzw. beim Zusammenbruch der gesamten elektrischen Anlage erfolgt. Für den Kurzschlussschutz werden nur vollkommene Kurzschlüsse betrachtet, d.h. die Fehlerstelle weist bei diesen Überlegungen keinen Widerstand (Impedanz) auf.

Ein Leitungsschutzschalter, der nach der Zuordnungstabelle in DIN VDE 0298-4 für den Überlastschutz am Anfang des zu schützenden Stromkreises ausgewählt ist, kann auch in der Regel den Kurzschlussschutz übernehmen. Das Ausschaltvermögen dieses Überstromschutzorgans muss mindestens dem größtmöglichen Kurzschlussstrom an der Installationsstelle des Überstromschutzorgans entsprechen. In Industrieanlagen mit hohen Leitungsquerschnitten kann der Kurzschlussstrom höher sein als das Ausschaltvermögen des Schutzorgans; es sind sodann gesonderte Maßnahmen zu berücksichtigen.

Die Ausschaltzeit beim Kurzschluss darf nicht länger sein als die Erwärmungszeit bis zur Grenztemperatur (PVC: 160 °C). Für Kurzschlüsse bis zu 5 Sekunden Dauer errechnet sich die zulässige Ausschaltzeit wie folgt

$$t = (k A I_{eff}^{-1})^2$$

wobei k der Materialbeiwert (Kupfer mit PVC-Isolierung: 115), A der Leiterquerschnitt (mm^2) und I_{eff} der Effektivstrom (A) sind. Diese ist mit der Kennlinie des konkreten Überstromschutzschalters (siehe Punkt 4.3.6.3) zu vergleichen, ob diese Bedingung eingehalten werden kann. Die Temperaturerhöhung im Leiter kann dann ebenfalls berechnet werden:

$$\Delta\vartheta = (I_k / A)^2 t K$$

wobei I_k der Kurzschlussstrom (A), A der Querschnitt des Leiters (mm^2), t die zulässige Abschaltzeit und K eine Materialkonstante (Kupfer: 0,005) darstellen. Die Endtemperatur im Leiter ergibt sich aus diesem Wert $\Delta\vartheta$ plus der vorher schon bei Belastung entstandenen Betriebstemperatur.

6 Erdschluss, Erdung

Bei einem Erdschluss erfolgt eine leitfähige Verbindung zwischen einem bzw. mehreren Außenleitern L mit dem Schutzleiter PE, einer Erdungsleitung, dem Potentialausgleich oder Gegenständen, die sich auf Erdpotential befinden. Der Erdschluss ist auch ein Fall von Überstromeinwirkung auf Leitungen. Prinzipiell gilt hier das beim Kurzschluss-Fall Angeführte.

Der widerstandslose Erdschluss, auch satter Erdschluss bezeichnet, ist wie der Kurzschluss, realitätsfern. Nur bei Falschinstallationen, Havarien oder Leitungsvertauschungen kann mit einem solchen Extremfall gerechnet werden. In der Praxis tritt ein widerstandsbehafteter Erdschluss auf, der den Fehlerstrom begrenzt und eine Abschaltung des Erdschlussstromes durch das Überstromschutzorgan verzögert oder möglicherweise verhindert.

Gewollte Erdschlüsse findet man auch beim Erden. Dabei soll bei möglichst geringem Leitungs- und Erdungswiderstand der Strom zur Erde abgeleitet werden. Das ist bei allen Erdungsanlagen gewünscht, um den Stromfluss widerstandsarm in die vorbestimmte Bahn zur Erde abzuleiten. Die Erdung der Fangeinrichtung ist beim Blitzschlag ein derartiger beabsichtigter Erdschluss. Erden ist auch ein wesentliches Schutzziel, um Restspannungen abzubauen. Nach dem Freischalten (Herbeiführen des spannungsfreien Zustandes) ist Erden eine der Hauptaufgaben nach den 5 Sicherheitsregeln gemäß VDE 0105; diese Maßnahmen sind zwingend und ausnahmslos vor Beginn der elektrotechnischen Arbeiten durchzuführen

Ebenso sind niedrige Erdungswiderstände bei den Schutzmaßnahmen wünschenswert, die den Fehlerstrom zur Erde ableiten sollen. Hier sind besondere Schutzmaßnahmen wie die Fehlerstromschutzschaltung (TT-Netz) zu nennen. Auch die Erdung des Mittelpunktes bzw. Sternpunktes (PEN) ist eine notwendige Schutzmaßnahme (Betriebserde).

Fließt Strom außerhalb der vorbestimmten Bahnen der Außenleiter $L1$, $L2$ oder $L3$ und der Neutralleiter N , so soll dieser Fehlerstrom in einem separaten Leiter, dem so genannten Schutzleiter (PE-Leiter), der mit der Erde verbunden ist, abfließen und keine anderen Wege, insbesondere nicht über den Menschen nehmen. Alle leitfähigen, direkt berührbaren Metallteile der elektrisch Betriebsmittel und Verbraucher sollen mit diesem PE-Leiter verbunden sein (Netz TN-S). Dieser nur der Schutzmaßnahme vorbehaltene PE-Leiter ist grün-gelb gekennzeichnet. Als Überwachungseinrichtung hat sich hier der Fehlerstromschutzschalter (RCD) bewährt, der beim Auftreten eines Fehlerstromes je nach seiner Empfindlichkeit schon bei kleinen Fehlerströmen eine rasche allpolige Abschaltung des von ihm geschützten Stromkreises bewirkt (siehe Punkt 4.3.6.3.4).

Gängige Nennfehlerströme von Fehlerstromschutzschalter sind 0,5 A, 0,3 A, 0,1 A, 0,03 A und 0,01 A. Nur die beiden empfindlichen Schalter 0,03 A und 0,01 A sind als Personenschutz geeignet, da deren Bemessungsfehlerstrom niedriger ist als der das Herz gefährdende Körperstrom (Mortalitätsschwelle ≈ 50 Milliampere).

7 Körperschluss

Unter Körperschluss versteht man einen Fehlerstromfluss von bestimmungsgemäß unter Spannung stehenden Geräteteilen zum leitfähigen Gehäuse eines elektrischen Betriebsmittels oder Verbrauchers. Dabei handelt es sich um Geräte der Schutzklasse I, die im TN- oder TT-Netz betrieben werden und sich somit auf dem Potential des N-Leiters des VNB (EVU) oder auf widerstandsbehafteter Erdverbindung befinden.

Im TN-Netz soll das vorgeschaltete Überstromschutzorgan das Bestehenbleiben des Körperschlusses verhindern, um zu hohe Ströme in den Versorgungsleitungen zu unterbinden. Der Zeitbedarf bis zum Ansprechen des Überstromschutzorgans hängt dabei ganz wesentlich vom Widerstand an der Stelle des Körperschlusses ab. Nur bei einem widerstandsarmen Fehlerstromübergang ist mit so hohen Strömen zu rechnen, dass die Auslösung vor Eintritt eines wesentlichen Schadens erfolgt. Es darf nicht übersehen werden, dass die Ströme auch Schweißwirkungen am Gehäuse herbeiführen können, so dass anliegendes brennbares Material entzündet werden kann.

Jeder Körperschluss führt außerdem zur Überleitung einer Berührungsspannung auf das Gehäuse und so zu einer Personengefährdung. Bei mehreren über Schutzleiter oder andere leitfähige Teile verbundenen Gerätegehäusen kann es zu vagabundierenden Strömen kommen, die in querschnittsarmen Schutzleitern zu brandgefährlichen Temperaturen anwachsen können. Auskunft über die Auslösezeiten und damit über den zu erreichenden Schutzpegel ergeben die Kennlinien (I - t -Kennlinien) der Schutzeinrichtungen (siehe Punkt 4.3.6.3) und die Auswertung des Schaltplans.

Im Fall des TT-Netzes werden Fehlerstromschutzschalter eingesetzt, deren Auslöseströme (Bemessungsfehlerstrom) wesentlich niedriger sind und die deshalb schon bei hohen Übergangswiderständen ansprechen (siehe Punkt 4.3.6.3.4). Zudem führen der Summenstromwandler und die Mechanik der Fehlerstromschutzschalter zu einer extrem niedrigen Auslösezeit im Millisekundenbereich (max. 0,05 s). Wird ein empfindlicher Fehlerstromschutzschalter verwendet, so kann dieser sogar als Personenschutz eingesetzt werden (siehe DIN VDE Baderäume, feuergefährdete Betriebsstätten, Landwirtschaft, Schaustelleranlagen, Campingeinrichtungen u. a.)

8 Wackelkontakt

Ein so genannter Wackelkontakt kann bei nicht sachgemäß verbundenen Leitungen oder druckarmen Kontaktstellen entstehen. Solche fehlerhaften Stromübergangsstellen sind brandgefährlich, weil hier intermittierend Lichtbögen gezündet werden, die zur Beschädigung der Kontaktflächen und so zu zunehmenden Übergangswiderständen führen. Die lokale Überhitzung kann zu einem Glühzustand an der Verbindungsstelle führen.

Betroffen sind alle Verbindungsstellen, die bei unsachgemäßer Ausführung, Alterung oder Oxidation einen Übergangswiderstand erhalten. Das sind Verbindungen mit Schraubklemmen, schraubenlose Steckverbindungen, Anschlüsse an Schienen oder Überstromschutzorgane und alle Leitungsverbindungen und Anschlussstellen. Der Übergangswiderstand kann nur durch eine großflächige, unter Druck stehende Verbindung reduziert werden, weil dann die kritische Stromdichte nicht erreicht wird.

Die Unterbrechungslichtbögen sind energiereich genug, um brennbare Gase und Dämpfe zu entzünden. Das können Pyrolysegase aus dem Isoliermaterial der Leitungen oder der Umgebung sein, aber auch brennbare Gase aus einem technischen Umfeld.

9 Schaltfunken

Schaltfunken sind hauptsächlich Trennungslichtbögen, die kurzzeitig beim Trennen oder beim Prellen von Schaltstücken auftreten. Sie können die Schaltkontakte abnutzen und sogar erheblich schädigen. Das Schadensszenario entspricht jenem des Wackelkontaktes.

Die innewohnende Energie reicht stets aus, eine explosionsfähige Atmosphäre zur Zündung zu bringen (siehe Punkt 4.7). So müssen in solchen Atmosphären, die meist in Betrieben bestimmungsgemäß oder im Störfall auftreten, umfangreiche Explosionsschutzmaßnahmen realisiert werden. Solche ex-gefährdeten Betriebsstätten sind weit verbreitet (z. B. Raffinerien, chemische Industrie, Kfz-Werkstätten, Großdruckereien, Lager brennbarer Flüssigkeiten und Gase, GÄranlagen u.v.a.). Die komplette elektrotechnische Anlage ist im Gefährdungsbereich explosionsgeschützt auszuführen. Generell gilt, dass in ex-gefährdeten Bereichen, die sorgfältig festzulegen sind, ein elektrischer Explosionsschutz zwingend ist.

In Bereichen, wo kein Explosionsschutz notwendig erscheint, ist das Entstehen von Explosionsatmosphären zu vermeiden, weil z. B. Schaltfunken stets auftreten können und dort auch dürfen. Wird eine gefährliche Konzentration von brennbaren Dämpfen oder Gasen herbeigeführt, z. B. bei Verklebungen von Bodenbelägen oder Reinigungsarbeiten mit brennbaren Lösungsmitteln, so sind alle Zündquellen, also auch alle Betriebsmittel mit Schaltstücken oder Schaltrelais abzuschalten. Nicht übersehen werden dürfen selbsttätige Schalt- und Regeleinrichtungen und auch Lichtschalter, in denen Trenn- und Prellfunken entstehen. Dabei bewährt sich die sichere Freischaltung aller Stromkreise in der Elektroverteilung, die in den Gefährdungsbereich führen. Der Gefährdungsbereich kann dabei wesentlich größer als der Arbeitsbereich sein.

4.3.6.3 Überstromschutz

4.3.6.3.1 Allgemeines

Der Überstromschutz soll verhindern, dass sich Leitungen oder Verbindungsstellen so erwärmen, dass ihre Isolierung beschädigt wird. Dies gilt für den Fall der Überlastung (siehe Punkt 4.3.6.2.3: 4.), des Kurzschlusses (siehe Punkt 4.3.6.2.3: 5.), des Erdschlusses (siehe Punkt 4.3.6.2.3: 6.) und des Körperschlusses (siehe Punkt 4.3.6.2.3: 7.). Um Schäden zu verhindern, müssen Leitungstypen, Leitungsverlegung, Leitungsquerschnitte, Umwelteinflüsse, Leitungslängen und die Überstromschutzorgane aufeinander abgestimmt werden.

So sind die Reihenschaltung von mehreren Verlängerungsleitungen zur Überbrückung größerer Versorgungsdistanzen (unzulässig hoher Stromkreisinnenwiderstand) oder das Benutzen einer auf dem Kabelroller aufgewickelten Leitung schon bei üblicher Belastung (Verlustwärmeakkumulation) bereits eine fehlende Abstimmung von Überstromschutzorgan, Leitungsquerschnitt und -länge. Beide Betriebsweisen implizieren eine unmittelbare und mittelbare Brandgefahr und Personengefährdung.

Wie bereits mehrfach dargelegt, führen auch Fehlerstellen zu brandkritischen Zuständen, weil der Fehlerstrom auch eine Fehlerleistung zur Verfügung stellt, die bei Ankopplung von Brennbarem zur Brandzündung führen kann. Die Installation von Überstromschutzeinrichtungen ist für den Brandschutz nicht zwingend effektiv, weil deren Auslegung von einem vollkommenen Kurz-, Körper- und Erdschluss ausgeht ($R_F = 0$). Auf die Details wird in Abschnitt 4.3.6.2.3 eingegangen.

In aller Regel wirkt an der Fehlerstelle ein Fehlerwiderstand R_F , der neben den anderen Stromkreiswiderständen den Strom im Fehlerstromkreis begrenzt. Das ergibt sich aus den Schädigungsmechanismen, denen zufolge der Isolationswiderstand an der Fehlerstelle beim Betreiben der elektrischen Anlage sukzessiv abnimmt, wie oben bereits ausführlich dargelegt (s. 4.3.6.2.2). Der Gefahrenzustand wird längst vor Erreichen des theoretischen Fehlerfalls $R_F = 0$ erreicht. Auch der Lichtbogen besitzt einen inneren Widerstand, wie in Abschnitt 4.3.6.2.3 1. dargelegt. Vielfach können auch andere Widerstände, wie die elektrischen Verbraucher, im Fehlerstromkreis zum Gesamtwiderstand beitragen. Den idealen Kurzschluss mit einem Übergangswiderstand von $R_F = 0 \Omega$ gibt es daher in der Schadenspraxis nicht.

Es ist deshalb der umgangssprachlich bezeichnete „Kurzschluss“ oder die damit einhergehende „Kurzschlussspur“ sprachlich sehr ungenau und unbefriedigend. Besser ist, von einem Fehlerstromübergang und einer Fehlerstromübergangsspur zu sprechen. Dieser Terminus ist nicht nur für einen realen Kurzschluss, sondern auch für reale Körper- und Erdschlüsse anwendbar.

Die an der Fehlerstelle vorhandenen Widerstände können zusammen mit den anderen Stromkreiswiderständen den Strom im Fehlerstromkreis sogar so beschränken, dass dieser zwar brandgefährlich ist, aber dennoch so gering bleibt, dass der Auslösebereich von Überstromschutzorganen nicht tangiert wird. Mit anderen Worten: durch ein Über-

stromschutzorgan (Sicherung, Leitungsschutzschalter) kann das Fließen dieses brandzündenden Fehlerstroms nicht unterbunden werden. Dieser Umstand ergibt sich aus den Eigenschaften der Überstromschutzorgane; es sind daher bei genauer Untersuchung eines Fehlerfalles die Auslösekennlinien der vorgeschalteten Überstromschutzorgane heranzuziehen und fallspezifisch zu beurteilen.

Als triviales Beispiel sei eine Schmelzsicherung Diazed (D-System) mit einem Bemessungsstrom (Nennstrom) von 10 A (roter Kennmelder) herangezogen. Diese kann einen Fehlerstrom von 10 A über Stunden fließen lassen, ohne dass es zum Durchschmelzen ihres Schmelzbandes kommt. Dabei wird im Stromkreis bei 230 V Versorgungsspannung eine Leistung von 2.300 Watt umgesetzt, die je nach Zustand der Fehlerstelle und ihrer unmittelbaren brennbaren Umgebung zweifelsfrei zu einer Inbrandsetzung führen kann. Der Widerstand des gesamten Stromkreises inklusive des stromdurchflossenen Verbrauchers beträgt in diesem Fall 23 Ohm.

Wie bereits angeführt, beträgt die brandkritische Leistung nur etwa 40 Watt. Addierte man diese Fehlerleistung zu der Grundlast im Stromkreis hinzu, so ergäbe sich ein Gesamtstromfluss, der sich aus dem Betriebsstrom eines Verbrauchers von beispielsweise 10 A und dem Fehlerstrom von nur 0,174 A zusammensetzt. Der Gesamtstrom beträgt in diesem Beispiel also 10,174 A. Eine vorgeschaltete D-Sicherung mit einem Bemessungsstrom von 10 A würde diesen Fehlerfall faktisch kaum bemerken und niemals den Stromfluss unterbrechen können.

Wie eingangs bereits erwähnt, müssen alle Betriebsmittel im Stromkreis aufeinander abgestimmt sein, damit a priori kein brandgefährlicher Zustand erreicht wird. Hierzu gibt es die umfangreichen Errichtungsbestimmungen nach VDE, die einzuhalten sind. Wird von diesen Bestimmungen gelegentlich abgewichen, ist der Nachweis der gleichwertigen Sicherheit zu erbringen.

Wesentlich für die Beurteilung der Betriebssicherheit der elektrischen Leitungen sind also

- der fließende Betriebsstrom I_b
- die Strombelastbarkeit der Leitung I_z
- der Nennstrom des Überstromschutzes I_n
- der Auslösestrom ($\leq 1,45 \cdot I_z$) I_2

Die Größen I_b , I_z und $1,45 \cdot I_z$ sind Bezugswerte der elektrischen Leitung, die Größen I_n und I_2 dagegen Kenngrößen der Schutzeinrichtung. Damit lassen sich Überstrom-Schutzeinrichtungen wie folgt zuordnen:

- Nennstrom-Regel $I_b \leq I_n \leq I_z$
- Auslöse-Regel $I_2 \leq 1,45 \cdot I_z$

Die Schutzeinrichtungen sind jeweils am Anfang des zu schützenden Stromkreises zu installieren. Sie müssen auch dort eingesetzt werden, wo die Strombelastbarkeit der Leitung I_z reduziert wird, z. B. vor Reduzierungen des Leitungsquerschnitts, aber mög-

licherweise auch vor Teilen mit anderen Umgebungsbedingungen oder bei Wechsel von Leitungstypen. Ausnahmen sind in den Errichtungsbestimmungen VDE enthalten.

Vielfach wird angestrebt, den Schutz bei Überlast und Kurzschluss zu koordinieren (DIN VDE T 430 Abschnitt 7). Das kann durch Leitungsschutzsicherungen (VDE 0636) oder Leitungsschutzschalter (DIN VDE 0641) erfolgen, die dem Leitungsquerschnitt angepasst sind. Wenn Überlast-Schutzeinrichtungen nach der zulässigen Strombelastbarkeit I_z unter Anwendung der o. a. Regeln bestimmt werden und diese das erforderliche Ausschaltvermögen besitzen, ist diese Koordination ebenfalls gegeben.

Im Zeit-Strom-Diagramm muss der Zeit-Strom-Bereich der Überstromschutzeinrichtung im gesamten Strombereich immer unterhalb der Kurve der zulässigen Belastbarkeit einer Leitung liegen:

$$I_n \leq I_z.$$

Bei normalen Umgebungs- und Verlegebedingungen ist somit eine am Anfang des zu schützenden Stromkreises eingebaute Überstromschutzeinrichtung ausreichend für den Überlast- und Kurzschlussfall.

In kritischen Fällen sind in DIN VDE 0100 verschiedenste Tabellen angeführt, die eine Überprüfung der Wirksamkeit der Überstromschutzeinrichtungen zulassen. Hier findet man die zulässigen Leitungslängen, Querschnitte, Abschaltzeiten.

Die Überstromschutzeinrichtungen sind alle sicherheitstechnische Trennelemente, die eine elektrische Anlage bei Überlastung oder Kurzschluss vor zu hohen Temperaturen schützen, indem sie den Betriebsstrom unterbrechen. Hierzu stehen zur Verfügung

- Niederspannungssicherungen DIN VDE 0636
- Leitungsschutzschalter DIN VDE 0641
- Geräteschutzschalter DIN EN 60934
- Niederspannungsschaltgeräte DIN VDE 0660
- elektromechanische Schütze und Motorstarter DIN EN 60647-4-1.

4.3.6.3.2 Schmelzsicherungen

Die in der Praxis am häufigsten zu beurteilenden Schutzeinrichtungen sind im Niederspannungsbereich (DIN VDE 0636)

- Messersicherungen (NH-System) für Elektrofachkräfte und elektrotechnisch unterwiesene Personen, für industrielle Nutzung bzw. im Hausanschluss
- Schraubsicherungen (D- oder DO-System) für Laien, überwiegend in Hausinstallationen verwendet

Zu beachten sind die Bemessungswerte, der Ausschaltbereich, die Betriebsklasse, das Ausschaltvermögen, die Ausschaltzeiten und vor allem die Strom-Zeit-Diagramme der konkreten Sicherungseinrichtung.

Eine **NH-Sicherung** (Messersicherung nach VDE 636 T201) besteht aus dem fest installierten Sicherungsunterteil und dem Sicherungseinsatz. Der Sicherungseinsatz ist als massiver Porzellankörper ausgeführt, an dessen Enden die metallischen Anschlüsse (Messer) herausragen und direkt berührbar sind. Die NH-Sicherungen können mit einem speziellen Bedienelement im stromlosen Zustand gefahrlos gewechselt werden. Ist die Sicherung stromdurchflossen, kann beim Entnehmen ein gefährlicher Lichtbogen gezündet werden, der Brände oder massive Personenschäden bewirkt. Sie besitzt zudem keinen Berührungsschutz und es besteht kein Verwechslungsschutz der NH-Einsätze. Ein Wechsel dieser NH-Sicherung ist als „Arbeiten an elektrischen Anlagen“ zu verstehen und daher der Fachkraft unter Benutzung eines speziellen Sicherungsgriffes und eines Personenschutzes vorbehalten.

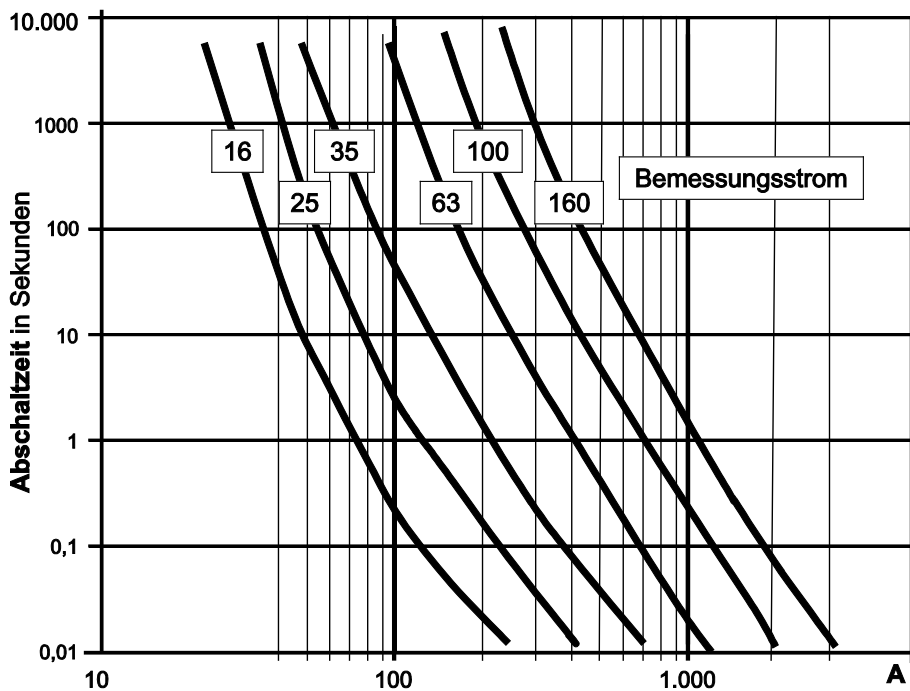


Abb. 20: Strom-Zeit-Kennlinien von NH-Sicherungen

Das D- oder D0-System, auch Diazed und Neozed bezeichnet (DIN VDE 636-3011), stellt die übliche Schraubsicherung im Niederspannungsbereich dar, wie sie in Haushalten und Industrie häufig zu finden ist. Es besteht aus dem fest installierten Sicherungssockel, dem Sicherungseinsatz (Sicherung), einer Passhülse (Passring) und der Schraubkappe, mit der der Sicherungseinsatz im Sicherungssockel unter Anpressdruck fixiert wird. Der Sicherungseinsatz besteht aus einem Porzellankörper, an dessen Enden die beiden metallenen Endkappen aufgesetzt sind. Wegen der Passhülse kann nur ein

Sicherungseinsatz mit niedrigerem Bemessungsstrom als auf der Passhülse angegeben eingesetzt werden; dafür sorgt die Bohrung in der Passhülse. Mit dieser einfachen Maßnahme kann ein Schutz gegen Übersicherung (zu hoher Bemessungsstrom I_n) hergestellt werden. In der Praxis ist festzustellen, dass die Passringe herausgeschraubt werden, um einen höheren Betriebsstrom zu entnehmen, was normenwidrig und als brandgefährlich abzulehnen ist. Es besteht durch die Schraubkappe konstruktiv auch ein Berührungsschutz, weshalb das Wechseln von Sicherungen unter den Begriff „Bedienen“ fällt, das jedem Laien erlaubt ist.

Schmelzsicherungen besitzen einen Auslösebereich. In diesem Bereich der Strom-Zeit-Kennlinie erfolgt die Auslösung der Sicherung, d.h. das Abschmelzen des Sicherungsbandes oder -fadens. Den Kennlinien ist zu entnehmen, dass ein höherer Laststrom zu einem rascheren Ansprechen der Schmelzsicherung führt.

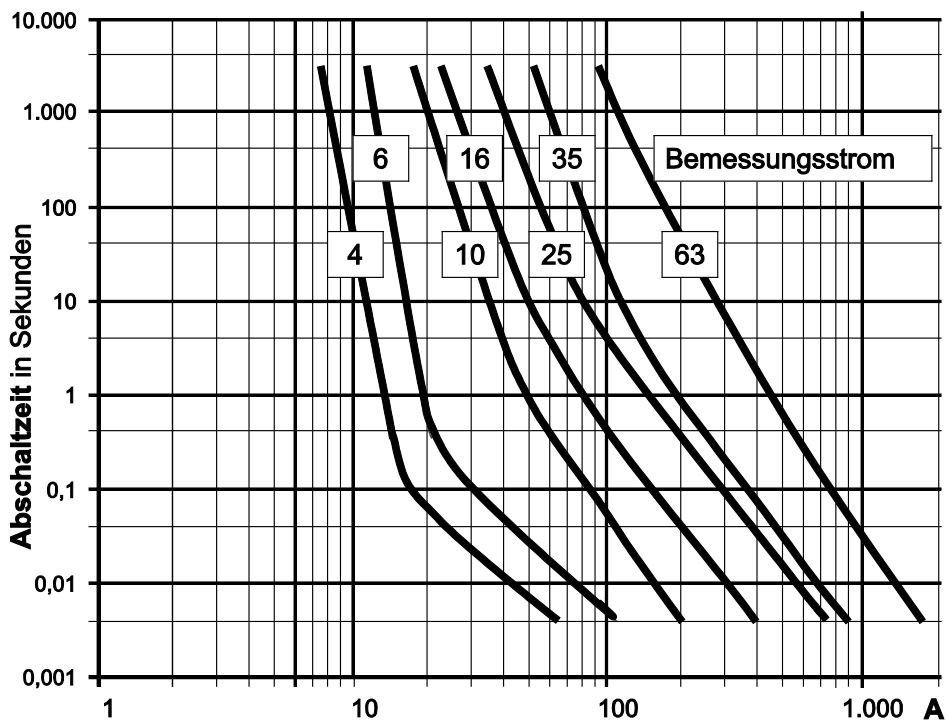


Abb. 21: Strom-Zeit-Kennlinien von D-Sicherungen

Berücksichtigt man im obigen Fall-Beispiel den mit der kritischen Fehlerleistung einhergehenden Fehlerstrom von 0,17 A (siehe Punkt 4.3.6.2.2), dann kann man dem Diagramm entnehmen, dass dieser Strom den Auslösebereich der Sicherung gar nicht tangiert. Für solche kleinen Ströme ist die Schmelzsicherung also nicht ausgelegt und daher wirkungslos. Schmelzsicherungen (oder Leitungsschutzschalter) können daher nur in Ausnahmefällen eine Brandzündung durch Fehlerstrom verhindern, nämlich nur dann, wenn der Gesamtstrom aus Last- und Fehlerstrom so groß wird, dass er den Auslösebereich der vorgeschalteten Sicherung erreicht.

Wollte man die Auslösung der Schmelzsicherung erzwingen, dann müsste im Stromkreis ein extrem niedriger Widerstand vorhanden sein, damit der Strom hinreichend groß wird. Nimmt man also zum Beispiel eine Auslösezeit von < 5 Sekunden an, ein Wert, der in Festinstallationen beim Personenschutz eine wichtige Rolle spielt, dann müsste im Fehlerstromkreis gemäß Auslöse- und Zeitstromdiagramm immerhin ein Gesamtstrom von > 25 A fließen. Im Stromkreis dürfen alle Widerstände daher nur etwa $R = 230 \text{ V} / 25 \text{ A} \approx 9 \text{ Ohm}$ betragen. Da dieser Wert bei Übergangswiderständen und dem inneren Widerstand des Lichtbogens nicht erreicht wird, sondern größer ist, kann also eine Abschaltung durch Sicherungsorgane in der gewünschten Zeit möglicherweise nicht erfolgen.

Die Auslösung der NH-Sicherung und der D- und D0 (D-Null) Sicherungen erfolgt in gleicher Weise. Der Überstrom erwärmt den im Zentrum eingebrachten Schmelzfaden oder das Schmelzband so, dass es schmilzt und den Stromkreis unterbricht. Der Schmelzfaden oder das Schmelzband (Schmelzleiter) sind von feinem Quarzsand umgeben, der kühlend wirkt und bei Überstrom-Abschaltung zur Löschung des Lichtbogens führt. Die Sicherungen sind mit einem farbigen Kennmelder ausgestattet, der bei den D-Sicherungen den Bemessungsstrom beschreibt und den Betriebszustand signalisiert. Auf den Schmelzbändern kann auch eine Weichlotperle aufgebracht sein, die beim Schmelzen zur Legierungsbildung führt und die Sicherung altern lässt. Einschnürungen oder Bohrungen des Schmelzbandes begünstigen kleine Einzellichtbögen, die durch den Sand leichter gelöscht werden können.

Um eine Beurteilung der Auslösung vorzunehmen, müssen die Porzellan-Gehäuse der Schmelzsicherungen vorsichtig aufgeschlagen werden, am besten in einem Tuch o.ä., um die losen Fragmente zu sichern. Anlauffarben und Schmelzerscheinungen lassen einen Rückschluss auf das Auslösegeschehen zu. Gerade Anlauffarben sprechen für einen langsamen Anstieg der Temperatur, während die Fragmentierung des Schmelzfadens für eine große Stromsteilheit spricht. Hier ist eine große Erfahrung nötig, um richtige, haltbare Rückschlüsse zu ziehen.

4.3.6.3 Leitungsschutzschalter

Leitungsschutzschalter (LS-Schalter nach DIN VDE 0641) sind in der Lage, Kabel und Leitungen gegen zu hohe Erwärmung bei Überlast und Kurzschluss zu schützen. Sie werden auch ugs. als Sicherungsautomaten oder kurz als Automaten bezeichnet.

Deren Kennlinien im Zeit-Strom-Diagramm unterscheiden sich deutlich von jenen der Schmelzsicherungen. Es sind zwei Bereiche zu erkennen, deren Überlagerung die Kennlinie bestimmt.

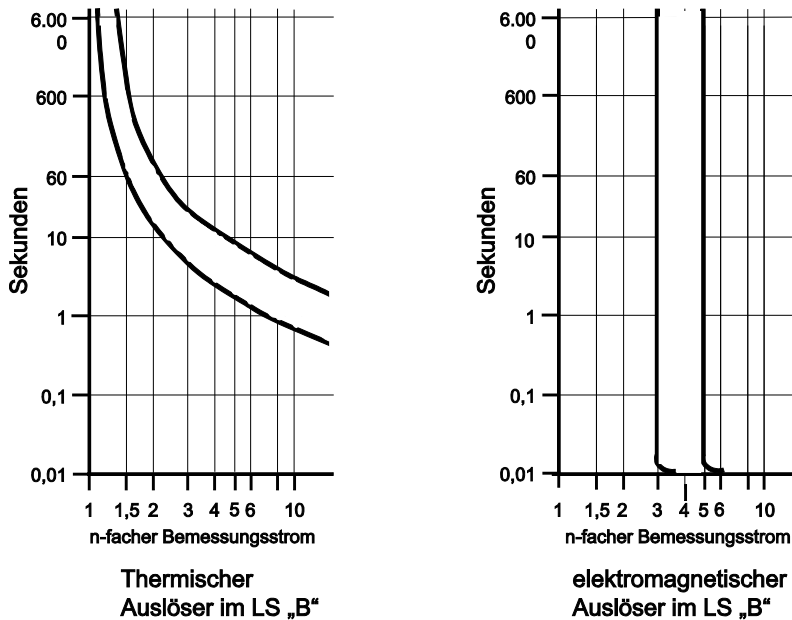


Abb. 22: LS-Kennlinien mit zwei unterschiedlichen Auslösemechanismen (Schema)

Diese Bereiche werden von zwei getrennt wirkenden Auslösemechanismen bestimmt:

- a) thermischer Auslöser (Bimetall) für Überströme
- b) elektromagnetischer Auslöser für Kurzschlussströme

Alle diese Kennlinien unterscheiden sich von jenen der Schmelzsicherungen insbesondere darin, dass nicht der Betriebsstrom I_b in Ampere aufgetragen wird, sondern das Vielfache des Bemessungsstroms I_n des LS-Schalters. Die Kennlinie ist daher für alle Bemessungsströme einer Charakteristik verwendbar. Um also einen Vergleich mit den Schmelzsicherungen durchzuführen, müssen die auf der Abszisse angegebenen Werte in Strom I_b umgerechnet werden, indem der Bemessungsstrom mit dem angegebenen Vielfachen zu multiplizieren ist.

Während der thermische Auslöser, also der Bimetallschalter, wegen seiner bei Durchfluss des Überstroms langsam eintretenden Verformung entsprechend träge auf den inneren Klinkenmechanismus einwirkt, spricht er schon bei mäßigen Überströmen mit einer akzeptablen Reaktionszeit an. Das ist sicherheitstechnisch tolerierbar, weil eine Überlastung ein aus dem Normalzustand sich entwickelnder progredienter Fehlerfall ist. Je höher der Überlaststrom ist, desto rascher spricht der thermische Auslöser an. Auf Kurzschlussströme reagiert der thermische Auslöser viel zu langsam, weshalb er mit einem elektromagnetischen Auslöser kombiniert werden muss.

Der elektromagnetische Auslöser ist ein Kurzschluss-Schnellauslöser, der hohe Ströme im Sekunden- bis Millisekundenbereich abschalten kann. Er ist deshalb so flink, weil der Überstrom spontan ein Magnetfeld aufbaut, das auf den inneren Klinkenmechanismus einwirkt.

Das Zusammenwirken der beiden Auslösertypen in einem LS-Schalter bestimmt daher die Zeit-Strom-Kennlinie. Konstruktiv können die Auslösebereiche beeinflusst werden, so dass je nach Anwendungsfall mehrere Auslösecharakteristiken mit unterschiedlichen Zeit-Strom-Kennlinien zur Verfügung stehen; es werden die Charakteristiken

B, C, D, K, L und Z

angeboten, um verschiedene Anwendungsfälle individuell abzudecken.

Die Charakteristik B wird am häufigsten verwendet. Dieser LS-Schalter löst zwischen dem drei- bis fünffachen Bemessungsstrom aus. Der Schnellauslösebereich z. B. beim Leitungsschutzschalter mit einem Bemessungsstrom von 16 A (LS 16A) erfolgt also bei einem Strom im Intervall von 48 A bis 80 A.

Die Charakteristik C wird für Stromkreise mit Maschinen und Motoren mit hohem Einschaltstrom eingesetzt und dient dem Leitungs- und Geräteschutz. Der Schnellauslösebereich ist gegenüber der Charakteristik B zu höheren Strömen verschoben, bei einem LS 16 A also im Bereich des fünf- bis zehnfachen Bemessungsstromes, also 80 A bis 160 A. Die Details sind den nachfolgenden Diagrammen zu entnehmen.

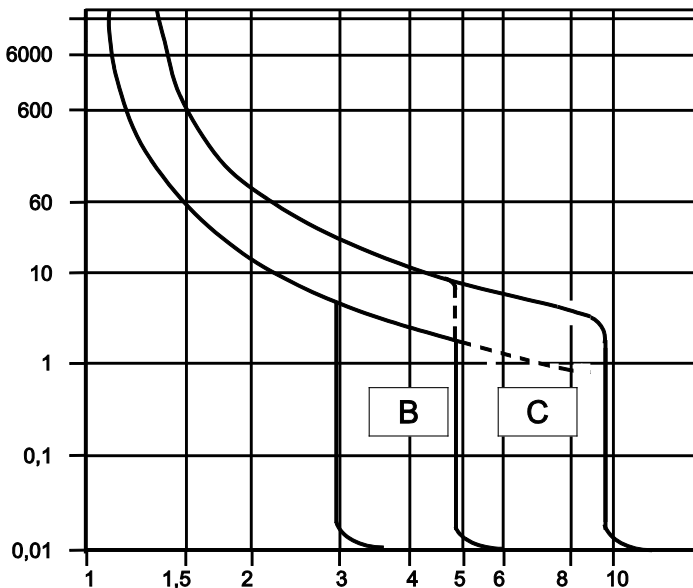


Abb. 23: LS-Kennlinie Typ B, LS-Kennlinie Typ C

Ergänzend zu den Überlegungen zum Fehlerstrom und der damit verbundenen Fehlerleistung sei auf das Verhalten der Leitungsschutzschalter bei mäßigen Überströmen hingewiesen. Bei vielen Kennlinien ist am oberen Ende des Auslösebereiches der Faktor für das Auslöseverhalten angegeben. Es handelt sich um den

- kleinen Prüfstrom und
- großen Prüfstrom

Die Bedeutung sei an einem Beispiel erläutert, bei dem ein Fehler in einem mit einem Leitungsschutzschalter LS 16 A geschützten 230-V-Stromkreis gegeben ist. Der Faktor für den kleinen Prüfstrom sei 1,13 und jener für den großen Prüfstrom 1,45. Daraus ergibt sich eine Fehlerleistung von

$$P_{\text{klein}} = U \cdot 1,13 I_n = 4.232 \text{ W}$$

$$P_{\text{groß}} = U \cdot 1,45 I_n = 5.336 \text{ W}$$

Das bedeutet für die Abschaltung des fehlerhaften Stromkreises durch den Leitungsschutzschalter B 16 A:

Fehlerleistung	Fehlerstrom	Abschaltzeit
< 4.232 W	< 18,08 A	keine Auslösung
= 4.232 W	= 18,08 A	früheste Auslösung nach 1 h
≤ 5.336 W	≤ 23,2 A	späteste Auslösung nach 1 h

Die Leitungsschutzschalter besitzen eine so genannte Freiauslösung. Sie stellt sicher, dass bei Kurzschluss eine sofortige Auslösung auch dann erfolgt, wenn der Schalthebel in der Ein-Stellung festgehalten wird.

Nach Überstromauslösung muss der thermische Auslöser (Bimetall) erst abgekühlt sein, bevor ein Wiedereinschalten möglich ist. Dadurch wird der Anwender bei einem raschen Wiedereinschaltungsversuch auf einen möglichen Fehler aufmerksam gemacht.

In älteren Anlagen findet man auch Schraub-Sicherungsautomaten. Es handelt sich hier auch um Leitungsschutzschalter mit einem Schraubsockel, der in das Schraubgewinde des D-Sicherungsunterteils eingeschraubt wird. Er wurde wegen seiner schlechteren Charakteristik vom LS-Schalter der Charakteristik B verdrängt.

4.3.6.3.4 Fehlerstromschutzschalter

Ein Fehlerstromschutzschalter nach DIN EN 61008-1 (VDE 0664 Teil 20) dient zum raschen Abschalten eines Stromkreises, wenn in diesem ein Fehlerstrom fließt und dadurch die Größe des in die Anlage fließenden Stroms mit der Größe des rückfließenden Stromes nicht übereinstimmt. Er ist netzspannungsunabhängig. Der Fehlerstromschutzschalter kann Erd- und Körperschluss-Fehlerströme erkennen, nicht aber Kurzschlussströme. Er ist für den Brandschutz von größter Bedeutung.

Meistens wird dieser Fehlerstromschutzschalter auch verkürzt als FI-Schalter oder FI-Schutzschalter bezeichnet. In den harmonisierten Regeln wird er als RCD für **R**esidual **C**urrent **P**rotective **D**evice bezeichnet. Es gibt auch Ausführungen, bei denen auch Leitungsschutzschalter integriert sind (RCBO: **R**esidual **C**urrent operated **C**ircuit-**B**reaker with integral **O**vercurrent protection nach DIN EN 61009-1, VDE 0664 Teil 20)

Der Fehlerstromschutzschalter wird am Anfang eines Stromkreises eingebaut. Durch ihn werden die Außenleiter (L1, L2, L3) und der Neutralleiter (N) geführt. Der Schutzleiter (PE: protection earth) darf nicht durch den Schalter geführt werden. Im TT-Netz muss der Anlagen-PE-Leiter mit der Schutzterde niederohmig verbunden werden. Im TN-S-Netz wird der PE-Leiter mit dem ankommenden Neutralleiter des VNB verbunden, was als „schnelle Nullung“ bekannt ist. An keiner Stelle des Stromkreises darf eine leitfähige Verbindung zwischen Schutz- und Neutralleiter geschaffen sein, weshalb der Einsatz im TN-C-Netz („klassische Nullung“) ausgeschlossen ist.

Der Fehlerstromschutzschalter überprüft, ob im zu schützende Stromkreis Fehlerströme oder Differenzströme auftreten, die größer als der Bemessungsfehlerstrom $I_{\Delta n}$ (Auslösestrom, Auslöseschwelle) des Fehlerstromschutzschalters sind. Sind diese größer als der Bemessungsfehlerstrom des FI-Schalters, wird der Auslösemechanismus im Millisekundenbereich aktiviert, was zur allpoligen Abschaltung des Stromkreises führt. Die Grundschialtung des Fehlerstromschutzschalters ist nachfolgend dargestellt.

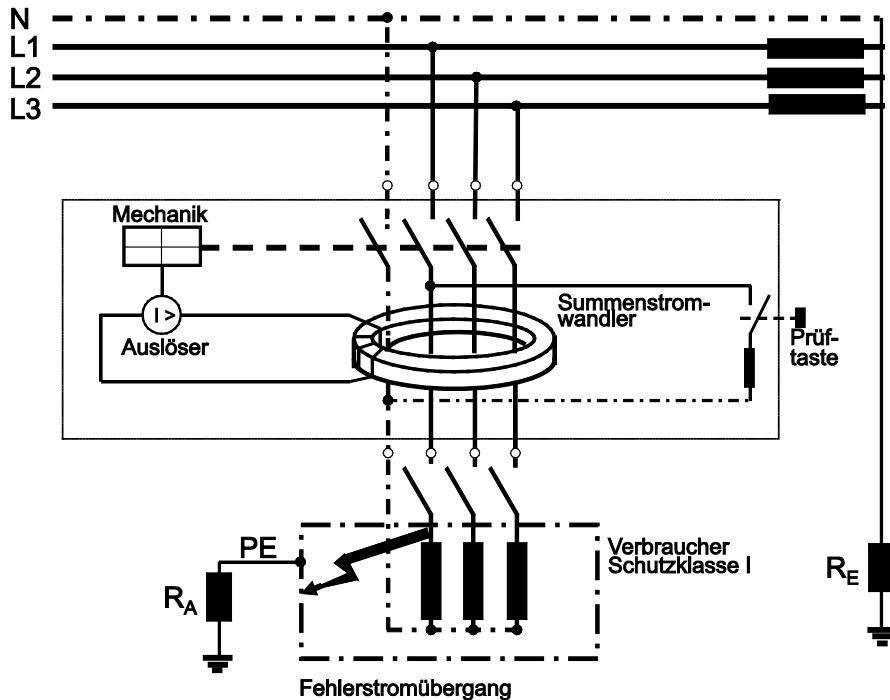


Abb. 24: Fehlerstromschutzschalter im Vierleitersystem (L1, L2, L3, N) – Funktionsprinzip TT-System

Im markierten Rechteck sind alle Teile des Schalters gezeigt; sie befinden sich in einem geschlossenen, berührungsgeschützten Gehäuse. Wesentliches Teil des Schalters ist der Ringkern, der als Summenstromwandler (Ringkernwandler) wirkt und den Fehlerstrom erfasst; der über den Fehler R_A abfließende Strom (Fehlerstrom) ist gleich dem Differenzstrom, der im Ringkern einen magnetischen Fluss erzeugt und in der Sekundärwicklung eine Spannung induziert. Diese aktiviert den Auslöser, der das Schaltschloss (Betätigungsorgan) anspricht und die allpolige Auftrennung des geschädigten Stromkreises (alle Außenleiter und Neutralleiter) herbeiführt.

Mit der Prüftaste (Testtaste T) kann in einem Außenleiter (hier L1) über einen strombegrenzenden Widerstand ein Fehlerstrom simuliert werden, der der Überprüfung der Schaltmechanik dient; es handelt sich also um eine Prüfeinrichtung für den Schalter, nicht aber für den Stromkreis. In den Normen ist die Betätigung der Prüfeinrichtung in bestimmten, vom Anwendungsort abhängigen Intervallen vorgeschrieben. Auf die konstruktiven Feinheiten des Fehlerstromschutzschalters und seiner Ausführungsformen ist hier nicht näher einzugehen, sie sind der Fachliteratur zu entnehmen.

Die Funktionstüchtigkeit einer Fehlerstromschutzschaltung kann nur an einer vom Schalter entfernten Stelle des Stromkreises messtechnisch bestimmt werden. Hierzu stehen Prüfgeräte zur Verfügung, mit denen der Auslösefehlerstrom im Bereich von 50 % bis 100 % des Bemessungsfehlerstroms bestätigt wird und ergänzend die Auslösezeit, die Berührungsspannung und der Erdungswiderstand gemessen werden. Lässt sich eine Messung nicht mehr in dieser Weise durchführen, ist wenigstens die Auslösung in der Nähe des FI-Schalters zu prüfen. Liegt eine Totalzerstörung vor, helfen eventuell Prüfprotokolle weiter.

Ortsveränderliche Fehlerstromschutzeinrichtungen tragen die Normenkurzbezeichnung PRCD (**P**ortable **R**esidual **C**urrent operated **D**evice, DIN VDE 0661 Teil 10) und werden zur Erhöhung des Schutzpegels eingesetzt. Fehlerstromschutzschalter an oder in fest installierten Steckdosen tragen die Bezeichnung SRCD (**S**ocket outlet with **R**esidual **C**urrent operated **D**evice, DIN VDE 0662) und werden in Anlagen mit Zweidrahtstromkreisen (L1 und PEN) verwendet. In beiden Fällen beträgt der Bemessungsdifferenzstrom ≤ 30 mA.

Neben dem netzspannungsunabhängigen Fehlerstromschutzschalter gibt es auch den netzspannungsabhängigen Differenzstrom-Schutzschalter, der verkürzt als DI-Schalter bezeichnet wird (s. 4.3.6.3.5).

Die Abschaltung des Stromkreises durch einen RCD erfolgt normengerecht

$$I_A = (0,5 \dots 1,0) \cdot I_{\Delta n}$$

und in der Praxis bei $I_A \approx 0,8 \cdot I_{\Delta n}$.

Die Abschaltzeit muss unter 200 ms liegen. In der Praxis sind die Schalter viel schneller geworden, so dass mit Abschaltzeiten um 40 ms zu rechnen ist. Die Kennlinie zeigt, dass die Fehlerstromschutzschalter die Höhe des Stromes nicht begrenzen, weshalb bei einem provozierten Erdschluss häufig Fehlerstromspuren an der Erdkontaktstelle ent-

stehen. Sie schalten beim Übersteigen der Auslöseschwelle aber ab, während davor der von der Netzsituation bestimmte Kurzschlussstrom fließen kann.

Die Bemessungsströme sind genormt:

RCD, DI: 10 A, 13 A, 16 A, 20 A, 25 A,

32 A, 40 A, 50 A, 125 A

RCBO: 6 A, 8 A, 10 A, 13 A, 16 A,

20 A, 25 A, 32 A, 40 A 125 A

In den europäischen Normen wird zwischen RCD und DI-Schalter nicht unterschieden; beide sind dort unter RCCB (*Residual Current operated Circuit-Breaker without overcurrent protection*) geführt.

Der Bemessungsfehlerstrom ist in den Normen ebenfalls vorgegeben:

$I_{\Delta n}$ 0,01 A, 0,03 A, 0,1 A, 0,3 A, 0,5 A

Es wird von einer Bemessungsfrequenz von 50 Hz und Bemessungsspannungen von 230 V/400 V ausgegangen, wobei 240 V und 415 Volt toleriert werden. Werte darüber sind brandkritisch einzustufen.

Die RCD und DI, also RCCB, sind gegenüber Schaltüberspannungen oder Blitzeinwirkung unempfindlich, jedoch ist ein Auslösen nicht ausgeschlossen. Die RCCB können im Temperaturbereich -5 °C und $+40\text{ °C}$ verwendet werden. Bei Anwendungen bis -25 °C müssen solche RCCB eingesetzt werden, die das Symbol der Schneeflocke tragen, in deren Mitte „-25“ eingetragen ist.

Bei Netzen mit Gleichspannungsanteilen ist besondere Vorsicht angebracht, da es zur Vormagnetisierung kommt, die sogar zum Versagen des RCD führt. Hierfür sind spezielle RCD erforderlich, die pulsierende Gleichströme beherrschen und als pulsstromempfindliche Schalter bezeichnet werden (Typ A). In einem Rechteck sind eine Wechselstromperiode und ein pulsierender Gleichstrom dargestellt. Bei Netzen, die pulsierende und glatte Gleichfehlerströme beherrschen sollen, ist ein allstromempfindlicher FI-Schutzschalter anzuwenden (Typ B). Er trägt das Symbol des Typs A und zusätzlich im Rechteck das Symbol des intermittierenden und des Dauer-Gleichstroms.

Im Fall einer Brandzündung durch Fehlerstrom kann das Überstromschutzorgan (Schmelzsicherung oder Leitungsschutzschalter) in der Regel keine rechtzeitige Abschaltung des Stromflusses herbeiführen, wie bereits mehrfach dargelegt. Im Fall des Erdschlusses kann der RCD nur brandverhindernd wirken, wenn er hinreichend empfindlich ist. Fließt ein Fehlerstromübergang zum Schutzleiter PE oder zu anderen geerdeten Anlagenteilen oder zur Erde selbst, führt der Fehlerstromschutzschalter in wenigen

Millisekunden eine Stromabschaltung durch, so dass durch die Zeitbegrenzung eine Brandzündung nicht erfolgen kann. In diesem Fehlerfall stellt der empfindliche Fehlerstromschutzschalter (Bemessungsfehlerstrom 0,03 A) einen optimalen Brandschutz und Personenschutz dar, was für den empfindlichsten RCD ($I_{\Delta n} = 0,01$ A) verstärkt gilt.

Fehlerstromschutzschalter mit Bemessungsfehlerströmen ≤ 300 mA begrenzen die Fehlerleistung somit auf unter 60 Watt; dies ist ein Wert, der auch als kritischer Wert toleriert wird. In vorsichtigeren Beurteilungen sieht man eine Leistung von 40 Watt als kritischen Grenzwert an, der eine Fehlerstrombegrenzung auf ≤ 170 mA verlangt.

Der empfindliche Fehlerstromschutzschalter mit $I_{\Delta n} \leq 0,03$ A wird zum Schutz bei direktem Berühren spannungsführender Teile eingesetzt; dies wird als Zusatzschutz bezeichnet. Solche FI-Schalter werden in Bereichen erhöhter Gefährdung eingesetzt, wie z. B. Badezimmer, Baustellen, Campingplätze, fliegende Bauten, Schaustellerwagen, Experimentierstände und Ersatzstromanlagen. Mit diesem Personenschutz ist also auch ein sehr effektiver Brandschutz realisiert.

Fehlerstromschutzschalter sollten daher auch in TN-C-S-Systemen eingebaut werden, weil damit der Brand- und Unfallschutz verbessert wird. Diese Schutzmaßnahme in den mit FI-Schaltern ausgerüsteten TN-C-S-Stromkreisen wird auch als „schnelle Nullung“ bezeichnet, weil es sich technisch um eine Anlage mit Nullung handelt, deren Abschaltzeit wegen der Eigenschaften des FI-Schalters sehr kurz ist (VDE 0100 Teil 410).

Wenn ein Fehlerstromübergang zwischen Außenleiter und Neutraleiter (Kurzschluss) erfolgt, so kann der Fehlerstromschutzschalter wegen seiner technischen Konzeption aber nicht ansprechen, weil dann vom Summenstromwandler kein Differenzstrom erkannt werden kann; dennoch kann er aber als relativer Brandschutz wirken, weil sehr häufig dabei infolge der großvolumigen Zerstörung der Isolierung auch ein Fehlerstrom zum mitgeschädigten Schutzleiter PE fließt und so sekundär eine Fehlerstromabschaltung erzwungen wird. Der Brandschutz ist dabei umso effektiver, je früher der Schutzleiter PE vom Primärschaden betroffen wird und je empfindlicher der Fehlerstromschutzschalter (RCD) ausgewählt wurde.

Auf der gleichen Technik wie die Fehlerstromschutzschalter beruhen die Fehlerstrom-Meldevorrichtungen (RCM), die Fehlerströme erfassen und anzeigen; sie besitzen jedoch keine Abschaltvorrichtung. Sie dienen der Überwachung von TN- und TT-Netzen und sind in manchen technischen Bereichen erforderlich (EDV-Anlagen, Motorüberwachung, Steuerstromkreise u. a.). Die Überwachung von IT-Systemen, die isoliert aufgebaut sind und eine hohe Verfügbarkeit aufweisen, ist mit den Meldevorrichtungen RCM effektiv durchzuführen. Das Ansprechen dieser Meldeinrichtungen kann für die Beurteilung des Zustandes der Elektrik von großer Bedeutung sein.

4.3.6.3.5 Differenzstromschutzschalter

Differenzstromschutzschalter, auch als DI-Schutzschalter oder verkürzt als DI-Schalter bezeichnet, sind grundsätzlich wie ein FI-Schalter aufgebaut, benötigen aber die Versorgungsspannung für die Auswerteelektronik (Verstärker). Der Aufbau entspricht jenem der FI-Schutzschalter; es kann auf Abschnitt 4.3.6.3.4 verwiesen werden.

Auf der gleichen Technik beruhen die Differenzstrom-Meldevorrichtungen, die Fehlerströme erfassen und anzeigen; sie besitzen jedoch keine Abschaltvorrichtung. Sie sind für TN- und TT-Netze geeignet.

4.3.6.3.6 Selektivität

Werden mehrere Überstromschutzorgane hintereinander, also in Reihe geschaltet, wie z. B. in der Hauptverteilung und den nachgeordneten Unterverteilungen und weiter zu Unter-Unterverteilungen, so müssen die Bemessungsströme der einzelnen Überstromschutzorgane so aufeinander abgestimmt werden, dass der fehlerhafte Stromkreis durch das Ausschalten nur der Fehlerstelle nächstgelegenen Sicherung vom Netz getrennt wird; die in Energierichtung davor liegenden Sicherungen sollen von dieser Auslösung unbeeinflusst bleiben, damit andere von dort abzweigende Stromkreise weiter betrieben werden können.

Eine Selektivität wird bei gleicher Charakteristik der in Reihe angeordneten Überstromschutzorgane bei einem Verhältnis der Bemessungsströme von etwa 1 : 1,6 erreicht. Im konkreten Schadensfall ist die Selektivität der in Reihe geschalteten Sicherungen zu ermitteln, um multiple Auslösungen zu verstehen und eventuell den primär ausgelösten Stromkreis zu ermitteln. Dieses auf der Selektivität beruhende Verfahren ist bei ausgedehnten Objekten und einer in vielen Ebenen aufgeteilten elektrischen Verteilung sehr nützlich, weil der Brandentstehungsbereich mittels selektiver Auslösungen der Sicherungsorgane eingegrenzt werden kann.

Ist also in einem Stromkreis ein LS-Schalter vorgeschaltet, dann muss dieser in der Lage sein, einen Fehler im Verbraucher im Stromkreis (Überlast, Kurzschluss, Körperschluss) sicher abzuschalten. Das Bemessungsschaltvermögen dieses LS-Schalters muss daher größer sein als der größte zu erwartende Kurzschlussstrom. Eine vorgeschaltete, also trafo nähere Überstromschutzeinrichtung (NH-, D-, D0-Sicherung) darf dabei nicht auslösen, da diese möglicherweise auch andere Stromkreise zu schützen hat.

Von Bedeutung sind daher die Kennlinien der in Reihe geschalteten Überstromschutzeinrichtungen. Vergleicht man diese, kann der Strombereich abgelesen werden, in dem zuerst der Stromkreisschutz anspricht. Die Kennlinie bzw. der Auslösebereich muss im Strom-Zeit-Diagramm unterhalb der Kennlinie des vorgeschalteten Überstromschutzorgans liegen.

Wird bei höheren Strömen ein Schnittpunkt beider Zeit-Strom-Kennlinien festgestellt, der als Übernahmestrom bezeichnet wird, ist zu prüfen, ob die Stromkreissicherung diesen Übernahmestrom auch ohne Schäden schalten kann; das ergibt sich aus dem Bemessungsschaltvermögen, das größer sein muss als der Übernahmestrom. Das Bemessungsschaltvermögen kann dem Aufdruck (Zahl im Rechteck) des LS-Schalters entnommen werden. Ist das Bemessungsschaltvermögen nicht ausreichend, ist mit der Zerstörung der Überstromschutzeinrichtung zu rechnen, so dass möglicherweise eine Abschaltung nicht erfolgt und an der Einbaustelle ein Lichtbogen-Kurzschluss gezündet wird.

In den Fällen, wo der Kurzschlussstrom größer als das Bemessungsschaltvermögen ist, kann der Schnittpunkt der Kennlinien durch eine geschickte Auswahl der Vorsicherung unter das Schaltvermögen der Stromkreisschutzes verlegt werden. Dadurch übernimmt die Stromkreissicherung den Schutz bei Überlast und Kurzschluss bis zum Übernahmestromwert und darüber die entsprechend ausgewählte Vorsicherung. Dieses Verfahren wird als Back-up-Schutz bezeichnet.

Ein sichereres Verfahren ist der Vergleich der so genannten I^2t -Stromkennlinien. Wird nach einer Sicherung ein LS-Schalter eingebaut, so muss dessen Ausschaltenergie $\int I^2 dt$ kleiner sein als die Schmelzenergie der vorgeschalteten Sicherung. Sind beide Werte gleich, ist die Selektivitätsgrenze erreicht. Sind die Ströme größer als die Selektivitätsgrenze, so lösen beide Überstromschutzorgane aus.

Bei Reihenschaltung von LS-Schaltern ist im Kurzschlussbereich keine Selektivität gegeben, da der Kurzschlussstrom höher liegt als die Ansprechgrenzen des magnetischen Auslösers; beide LS-Schalter sprechen somit an.

Bei Fehlerstromschutzschaltern RCD kann eine Selektivität gegen RCD des normalen Typs erreicht werden, wenn diese mit dem Kennzeichen „s“ für selektiven Schutz gekennzeichnet sind. Dieser selektive RCD reagiert zeitverzögert. Sie sind auch unempfindlich gegenüber Stoßspannungen, durch die ein Überschlag und ein Fehlerstrom erzeugt werden.

4.3.6.4 exemplarische Prüfliste

Aus den möglichen Fehlerursachen lässt sich ein Prüfkatalog entwickeln, der mindestens folgende Punkt umfasst:

- Zustand der Isolierung
- Dimensionierung der Leiterquerschnitte
- Zustand der Überstromschutzorgane
- Prüfung auf angemessenen IP-Schutzgrad
- Nachweis von Sicherheitsabständen
- Rekonstruktion von Wärmestau-Situationen
- Prüfung der Überlastung von Betriebsmitteln
- Abschätzung eines Spannungsfalls
- Beachtung von Datenblätter, Hersteller- und Sicherheitshinweisen
- Feststellen des Verschmutzungszustandes
- Merkmale von Laienarbeit
- Prüfung fehlender Beaufsichtigung

- Anpassung Leuchten/Lampenleistung
- Prüfung der natürlichen und technischen Konvektionskühlung
- Überprüfung des Zustandes der Schutzleiter
- Überprüfung des Potentialausgleichs
- Maßnahmen zur elektrostatischen Erdung
- Fehlbedienungen
- Suche nach Spuren eines Fehlerstroms oder einer Blitzentladung
- Feststellungen zu mangelhaften Leitungsverbindungen
- Prüfung des Zustandes von Kontaktflächen (Schalter, Relais)
- Nachweis von Neutralleiterunterbrechung

Es besteht kein Zweifel, dass diese Prüfliste den örtlichen Gegebenheiten anzupassen ist und auch nicht vollständig sein kann. Sie ist also nicht einfach eine Check-Liste, die kritiklos abzuarbeiten ist.

4.3.6.5 Installationsbus, Fernwirktechnik

Die herkömmlichen Elektroverteilungsanlagen besitzen Inselstruktur. Sie zeichnen sich durch einen hohen technischen Aufwand aus und sind wegen der notwendigen Verknüpfungen sehr leitungsintensiv. Das erfordert eine umfangreiche Planung, eine aufwändige Installationsarbeit und führt wegen der Verbrennungswärme der vielen Leitungen zu einer hohen Leitungsbrandlast und zu hohen Kosten. Dies gilt insbesondere bei Erweiterungen oder Abänderungen der Anlage. Der komplexe Aufbau ist unübersichtlich und gefährdet u.U. die Betriebssicherheit. Dennoch hat sich das System bewährt und wird immer noch standardmäßig angewendet.

Zunehmend findet man als moderne Lösung das BUS-System (**B**inary **U**nit **S**ystem). Dabei wird die Übertragung der elektrischen Energie von der Übertragung der Information getrennt. Die elektrische Energie wird direkt zum Verbraucher geführt bzw. zu dem im Verbraucher oder in seiner Nähe installierten Fernschalter (Aktor). Alle Aktoren und Sensoren sind über ein geschirmtes verdrehtes Leitungspaar, dem Installationsbus, miteinander verbunden und können so Informationen austauschen. Ein solches Bussystem ist z. B. der Europäische Installationsbus EIB (**E**lektro-**I**nstallations-**B**us-Anlagen). Die Planung, Projektierung und Inbetriebnahme erfolgt mit Hilfe des herstellerunabhängigen Softwaretools ETS.

Durch den EIB können alle technischen Abläufe im Haus zentral geregelt werden, z. B. Heizung, Klima, Beleuchtung, Rollläden, Markisen, Einbruchsicherung und Brandmelder. Alle motorbetriebenen Verbraucher lassen sich mit einer Einzel-, Gruppen- oder Zentralsteuerung bequem bedienen. Mit EIB und dem entsprechenden Sensor sind z. B. Markisen vor jedem aufkommenden Unwetter geschützt

Sensoren nehmen Informationen (Eingaben) auf und senden diese als Datentelegramm auf den Bus. Die Aktoren empfangen die Telegramme (Informationen) und setzen sie z. B. in Schaltbefehle um. Über den Bus wird sowohl die Spannung für den Bus, als auch die eigentliche Information übertragen. Jeder Teilnehmer (Aktoren oder Sensoren) erhält eine so genannte physikalische Adresse. Nur wenn Bereich, Linie und Teilnehmer bekannt sind, kann ein Teilnehmer gezielt angesprochen werden.

Der EIB besitzt für die Schadenverhütung einige Vorteile gegenüber der konventionellen Elektroinstallation (einfache Planung, Reduzierung der Leitungen, optimierbare Regelungen, Signalisierung von Zuständen, vereinfachte Fehlersuche, vereinfachte Umnutzungen, einfache Parametrierung).

Der Informationsaustausch kann auch netzgebunden erfolgen (Powerline-Technik). Dabei müssen jedoch Bandsperren eingesetzt werden, um eine Abgrenzung gegenüber dem übrigen Netz darzustellen. Schließlich ist auch noch auf das Funknetz hinzuweisen, wo drahtlos Informationen mittels Rf-Signalen oder per IR ausgetauscht werden.

Mit Hilfe des BUS-Systems kann das so genannte „intelligente Haus“ realisiert werden. In Großanlagen und -objekten ist der Einsatz des EIB besonders wirtschaftlich und komfortabel, im Eigenheimbereich noch relativ kostenintensiv. Auf neuere Bussysteme wie KNX, LON oder LCN ist hinzuweisen.

Fernwirktechnik ist nicht unproblematisch. So können Verbraucher an ferngeschalteten Steckdosen in Betrieb genommen werden und dabei örtliche Betriebsmodalitäten außer Acht bleiben. Manipulationen der Software sind am Einsatzort möglich, aber auch über Datennetze. Denkbar sind auch Veränderungen und Auslösungen von Schalt- und Regelvorgängen durch das Datennetz und Blockierungen von Rückmeldungen von Daten und Gefahrenzuständen. Dadurch können in Anlagenteilen durchaus auch brandgefährliche Zustände herbeigeführt werden oder Betriebsstörungen provoziert werden.

Bei Anlagen mit Fernwirkung ist häufig der Einsatz von Brandmeldern zwingend, wenn Gefahrenzustände am ferngesteuerten Verbraucher nicht erfasst und gemeldet werden.

Die Auswertung der BUS-Informationen ist häufig nur durch Beiziehung des Herstellers bzw. der Fachkraft für die Parametrierung möglich. Das stellt für den Ursachenermittler eine zusätzliche Erschwernis dar, da dessen Dienstleistung ebenfalls zu kontrollieren ist und zumindest auf Plausibilität geprüft werden muss.

Die Ermittlung einer elektrotechnischen Brandursache ist im BUS-System erschwert. Das liegt darin begründet, dass durch die gleichzeitige Versorgung vieler Aktoren eine Zuordnung ausgelöster Überstromschutzorgane zu konkreten Verbrauchern oder schadhafte Leitungen erschwert ist. Die Sensoren und Aktoren sind außerdem elektronische Geräte, die häufig im Brand restlos zerstört werden.

4.3.7 Brandursachen in Fahrzeugen

Brände von Fahrzeugen sind oft Gegenstand kriminaltechnischer Untersuchungen, weil es aus straf- wie zivilrechtlicher Sicht zu entscheiden gilt, ob eine technische oder eine willentliche Zündung vorliegt. Bei der willentlichen Entzündung ist zu beachten, dass dies nach dem letzten Reformgesetz ein Straftatbestand ist und dass z. B. die Versicherungsleistung verweigert wird.

Die technischen Zündmöglichkeiten sind äußerst vielfältig und sind hier in anderem Zusammenhang bereits ausgeführt. Insofern scheint das Kapitel Fahrzeugbrände nicht in die Systematik der Brandursachen zu passen. Bei der komplexen Untersuchung von Fahrzeugbränden gibt es aber besondere Aspekte zu beachten, die nachfolgend erläutert werden.

Bei der Ursachenerforschung von Fahrzeugbränden kommt es auf die Feststellung der Zündquelle an, wobei das Spektrum der möglichen technischen Ursachen sehr breit ist und auf engem Raum konzentriert ist. Diese sind in mehreren Abschnitten des Kapitels 4 als Einzelursachen dargelegt. Das brennbare Material ist in vielfacher Weise vorhanden und stammt aus der technischen Ausstattung der Fahrzeuge oder ist den Betriebsstoffen, den technischen Betriebsflüssigkeiten und der Beladung mit brennbarem Gut zuzuordnen. Im Fehlerfall gilt es nachzuweisen, warum brennbare Flüssigkeiten ausgetreten sind.

Die Freisetzung der Brandleistung erfolgt anfangs moderat und erreicht beim Vollbrand im Inneren eines PKW rasch in einigen Minuten das Maximum. Ein Beispiel für die zeitliche Entwicklung der Temperatur eines Fahrzeugbrandes im Innenraum ist dem nachfolgenden Diagramm zu entnehmen, das als Schema für viele PKW-Brände gilt. Dabei werden dem technisch gezündeten Brand (Normalabbrand) auch die Varianten Zündung mit Brandbeschleunigungsmittel (beschleunigt) und Schwelbrand ohne Zündung (Schwelen) vergleichend gegenübergestellt. Die genaue zeitliche Entwicklung hängt natürlich sehr davon ab, wo der Brand gezündet wurde.

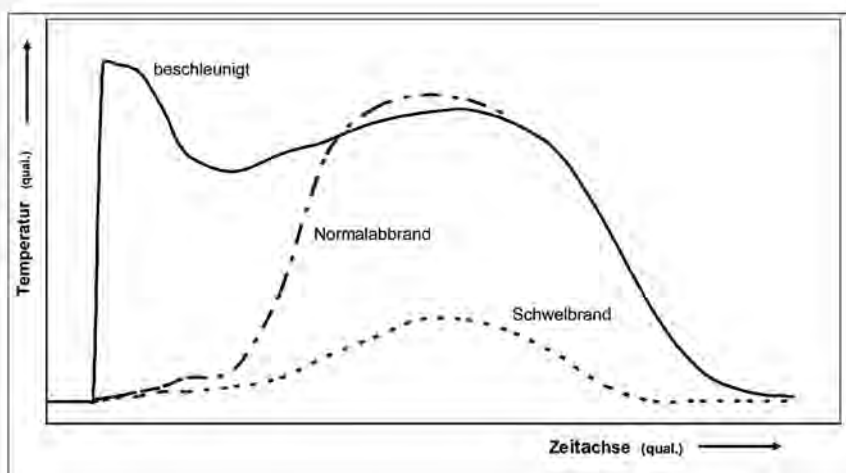


Abb. 25: schematischer zeitlicher Temperaturverlauf bei einem PKW-Brand,

Gemeinsam ist allen PKW-Bränden, dass nach einer Branddauer von 60 Minuten das brennbare Material verbraucht ist und somit der Brand selbständig verlöscht. An total ausgebrannten Fahrzeugen ist die Ursachenfeststellung daher mit größten Schwierigkeiten verbunden, da Spuren und Spurenträger in der Regel vernichtet sind.

4.3.7.1 Untersuchung von Fahrzeugbränden

Fahrzeugbrände sind nach dem 6. Strafrechtsreformgesetz in den Katalog des § 306 StGB aufgenommen; Inbrandsetzen von fremden Fahrzeugen wird daher als Brandstiftung geahndet und ist daher ein nicht unerheblicher Teil der Brandursachenerforschung geworden. Man muss sich vor Augen halten, dass etwa ein Drittel der in Brand geratenen Fahrzeuge auf eine willentliche Handlung zurückzuführen ist, um Vorschäden (Unfallschäden, defekte Motoren oder schadhafte Getriebe) zu vertuschen und die Neubeschaffung über Versicherungen abzuwickeln. Unkündbare Leasingverträge können ebenfalls Ausgangspunkt einer Fahrzeugbeseitigung durch Inbrandsetzen sein.

Durch polizeiliche Maßnahmen der Aufklärung und der kritischeren Beurteilung durch die Versicherungen nehmen die Fallzahlen ab. Auch die Häufigkeitszahlen der technischen Inbrandsetzungen zeigen wegen des zunehmenden Sicherheitsstandards eine abnehmende Tendenz. Die Produkthaftung führt zu Rückrufaktionen, so dass eine höhere Brandsicherheit erreicht wird.

4.3.7.2 Grundlagen der Brandentstehung

Auch die Inbrandsetzung eines Fahrzeugs erfordert Brennbare, Verbrennungsluft und eine effektive Zündquelle; für den Zünderfolg kommt es auf die zeitliche und örtliche Koinzidenz dieser bestimmenden Größen an. Entscheidend ist, wie bei allen Bränden, die Übertragung der Mindestzündenergie, die durch die Temperatur der Zündquelle und die Einwirkungsdauer bestimmt wird.

In Fahrzeugen sind große Mengen an Brennbarem vorhanden (Motoröl, Getriebeöl, Hydrauliköl, Kraftstoff, Gefrierschutzmittel, Bremsflüssigkeit, Kunststoffe, Kleber, Textilien). Gerade der Einsatz von Kunststoffen und Klebern nimmt ständig zu (Korrosionsstabilität, Gewichtsreduzierung, Formgebung). In PKWs finden sich brennbare Materialien bis zu einigen Hundert Kilogramm. Daraus ergeben sich Brandlasten von ca. 300 MJ m^{-2} und während der Vollbrandphase eine Leistung von ca. 5 MW bis 8 MW. Es werden daher extreme Energiemengen freigesetzt, die nicht nur zur Totalzerstörung der Fahrzeuge, sondern auch zu einem Brandübergang auf benachbarte brennbare Teile (Bewuchs, Gebäude) führen können. Die Branddauer von ca. einer Stunde ist deshalb nicht verwunderlich. Bei Beladungen der Fahrzeuge, insbesondere der Lastkraftwagen, können stundenlange Brände auftreten.

Im Innenraum können die Sitzbezüge, die Polsterung, die Fußraum- und Türauskleidungen, die Dachbespannung (so genannter Himmel), die Armaturenbrettverkleidung und andere eingebrachte Gegenstände in Brand gesetzt werden. Nach den US-Normen und deutschen Normen ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit eines Brandes im Fahrzeuginnenraum begrenzt (11 cm/Minute). Tabakglut und Streichholz allein führen nicht zu einer In-

brandsetzung, wohl aber geringe Mengen an Brandbeschleunigungsmitteln (Kraftstoff, Lösungsmittel, zerknülltes Zeitungspapier). Kunststoffe schmelzen in der Regel und können brennend abtropfen, sie ergeben jedoch keinen Glimmbrand.

Im Außenbereich des Fahrzeugs sind erhebliche Mengen an Kunststoffen als Anbauteile verarbeitet. Hier sei nur an den Kühlergrill, die Zierleisten, die Spoiler und die Stoßfänger erinnert. Sie lassen sich ebenso wie Gummiteile mit einer Kleinbrennerflamme entzünden. Ein entsprechender Brenntest an Resten oder Vergleichsteilen verschafft hier rasch Klarheit, da die Fahrzeugindustrie mittlerweile die Schwerentflammbarkeit dieser Kunststoffteile anstrebt.

Im Unterbodenbereich finden sich ebenfalls Gummi- und Kunststoffteile, aber auch der Unterbodenschutz (Korrosionsschutz). Die Reifen, die sekundär oder mit Hilfsenergie entzündet werden können, stellen ein großes Energiepotential dar und tragen zur Totalzerstörung des Fahrzeugs und insbesondere zur starken Rußbildung bei. Versuche zeigen, dass der Reifengummi sogar mit einer Kleinbrennerflamme entzündet werden kann, dass er aber dann nur mit einem Stützfeuer vollständig abbrennen kann. Die Anwendung von Brandbeschleunigungsmitteln in der Größenordnung von 0,25 Liter kann bereits zu einem Totalbrand führen.

Kraftstofftanks aus Kunststoff besitzen eine begrenzte Feuerwiderstandsdauer, sie werden aber regelmäßig im Brandgeschehen vom Brand erfasst und total zerstört, wobei ausgetretener Kraftstoff den Nachweis von Brandlegungsmitteln zumindest im Boden sehr erschwert, besonders wenn diese dem Inhalt des Tanks entsprechen.

Im Motorraum sind Kraft- und Betriebsstoffe sowie technische Ausstattungen aus Kunststoff und Gummi, wie Behälter, Luftfiltergehäuse, Schläuche, Lüfterhauben, schallabsorbierende Auskleidungen, Anbauten, Radhausauskleidungen, Scheinwerfergehäuse, Motorabdeckungen, vorhanden, die zu der erwähnten hohen Brandlast beitragen. Auch versehentlich oder absichtlich zurückgelassene Servicelappen stellen nicht nur eine lokale Brandlast dar, sondern können direkt an heiße Oberflächen ankoppeln und damit zur Brandursache werden.

Die konzentrierte hohe Brandlast führt bei einem Fahrzeugvollbrand zu meterhohen Flammen und zu starker Rußbildung. Insofern sind Fahrzeugbrände relativ einfach zu entdecken. Gerade dieser Umstand führt bei Inbrandsetzungen zur Benutzung von brandbeschleunigenden Mitteln, um einen Zerstörungsvorsprung zu erzielen. Flüssige Brandbeschleunigungsmittel führen zu einer spontanen Entflammung einer Vielzahl von brennbaren Komponenten, so dass ein Löscherfolg eher nicht zu erwarten ist.

Bei Fahrzeugen mit Kunststoffkarosserien wird diese in der Regel restlos zerstört. Das Schadensausmaß ist so groß, dass eine Eingrenzung des Ortes des primären Brandes sehr erschwert, wenn nicht gar unmöglich wird. Auch Karosserien aus Aluminium (Wohnanhänger, hochwertige Kfz) werden wegen des niedrigen Schmelzpunktes völlig zerstört, so dass rasch ein Freiabbrand der Innenausstattung und somit eine Totalabbrand erfolgt.

4.3.7.3 technische Brandursachen in Fahrzeugen

Die Feststellung der Brandursache erfolgt wie bei den Gebäudebränden durch Lokalisierung des Brandentstehungsortes mittels Bewertung des Spurenbildes. Erschwert wird diese primäre Aufgabe durch die räumliche Konzentration von zahlreichen brennbaren Komponenten. Dennoch gelingt auch hier bei Beachtung der Gesetze der Branddynamik, insbesondere der Energietransportmechanismen (Wärmeleitung, Konvektion, Wärmestrahlung), eine Eingrenzung des Zündortes. Hilfreich sind hierbei die Erkenntnisse aus den Brandversuchen bezüglich der Branddynamik von Fahrzeugbränden. In diesem Zusammenhang müssen die Angaben der Geschädigten, möglichst in der ersten Befragung, kritisch beurteilt werden und eine entsprechende Plausibilitätsprüfung durchgeführt werden.

In der Regel ist auch hier das Eliminationsverfahren (siehe Punkt 3.1) anzuwenden, da es gilt, eine Vielzahl konkurrierender Brandursachen zu bewerten. In einigen Fällen gelingt eine direkte Beweisführung (siehe Punkt 3.2), insbesondere, wenn der Nachweis eines Brandbeschleunigungsmittels erfolgt ist.

Eine technische Ursache eines Fahrzeugsbrandes kann thermischer, mechanischer oder elektrischer Natur sein. Diese betriebsbedingten Ursachen sind von unfallbedingten Zündungen und von Vorsatztaten zu unterscheiden. Besonders schwierig gestaltet sich diese Differenzierung, wenn eine Willenshandlung durch technische „Mängel“ zu kassieren versucht wird.

Im Bereich des Motors stehen Leckagen von Betriebsstoff- oder Kraftstoff-führenden Leitungen oder Behältern im Vordergrund, weil diese im Fall der Zündung spontan hohe Energiemengen frei setzen. Öl kann aus dem Motor, aus dem Ölkühler, aus dem Getriebe und aus der Hydraulikanlage austreten. Begünstigt wird eine Inbrandsetzung, wenn die brennbaren Flüssigkeiten unter hohem Druck transportiert werden, weil Leckstellen mit geringstem Querschnitt zu einer Verdüsung (disperses System) führen und so schon bei niedrigen Betriebstemperaturen eine Entzündung erfolgen kann. Da der Abbrand von Ölen relativ langsam erfolgt, muss mit einer länger andauernden Feuereinwirkung gerechnet werden.

Es sind daher alle betriebsstoffführenden Systeme zu überprüfen, um das Eliminationsverfahren sorgfältig durchzuführen. Bei der häufig feststellbaren Totalzerstörung der Leitungsverbindungen oder der Förderschläuche gelingt der Nachweis einer Leckage zumindest indirekt durch Spritzspuren von Öl am Unterboden oder auf der Fahrbahn vor der Anhaltestelle. Der Füllstand des Motor- und Getriebeöls ist zu überprüfen, wobei bei Zerstörung der Zylinderkopfhabe durch Eindringen von Löschwasser das Zweiphasengemisch Öl/Wasser in der Ölwanne einen hohen Füllstand vortäuschen kann.

Leckstellen sind ein fehlender Öleinfülldeckel, der Ventildeckel, die Kopfdichtung, der Motorblock, die Ölwanne, sämtliche perforierte Schläuche, der Ölkühler, die Messstaböffnungen, die Entlüftungsöffnung, der Getriebegehäusedeckel und das Servosystem und alle Verbindungsstellen der Hydraulikanlage. Auf Risse in Gehäusen und an Dichtungen und Perforationen ist zu achten. Mechanische Schadensspuren können auf mögliche Leckagestellen hinweisen.

In gleicher Weise ist das Fördersystem für den Kraftstoff zu untersuchen. Da Dämpfe von Ottokraftstoff nur innerhalb der Konzentrationsgrenzen von 0,6 Vol.-% (UEG) bis 8 Vol.-% (OEG) explosionsfähig sind, tritt während der Fahrt wegen der Fahrtwind-Verdünnung häufig kein Zünderfolg ein. Erst bei Überschreitung der UEG, z. B. bei verlangsamer Fahrt oder beim Fahrzeugstillstand tritt eine spontane Entzündung auf. Dabei erfolgt wegen des hohen Dampfdrucks eine spontane großvolumige Flammenbildung beschränkter Brandzeit, so dass ein Übergriff des Flammenbrandes auf Brennbares begünstigt wird. Bei geringfügigen Leckagen kann ein Brandstillstand eintreten.

Leckstellen sind das gesamte Fördersystem, wo zwangsläufig zahlreiche Leitungsverbindungen und Übergänge von flexiblen zu starren Förderwegen vorliegen. Besonders die druckbeaufschlagten Einspritzsysteme verdienen eine besondere Beachtung. Die starren Fördereinrichtungen können durch Gewalteinwirkung, die flexiblen durch Übertemperaturen, Alterung oder andere zufällige oder absichtliche Beschädigungen undicht werden. Auch unzulängliche Schraubverbindungen können als Schwachstellen auftreten. Im Fördersystem ist nicht nur die Vorlauf- sondern auch die Rücklaufleitung zum Tank zu untersuchen. Nicht zu übersehen sind die Zusatzheizungen, die gelegentlich nachgerüstet werden.

Kraftstoffe werden unter Druck gefördert. Eine Kraftstoffpumpe sorgt für Versorgungsdrücke von 1 bar bis 2 bar, Einspritzpumpen für Drücke von einigen bar. Dieseleinspritzpumpen erreichen sogar einige Hundert bar. In jedem Fall ist der Vordruck für die Gefahrenbeurteilung zu ermitteln.

Gasbetriebene Motoren können in gleicher Weise brandgefährlich werden, weil das Betriebsmittel innerhalb bestimmter Konzentrationsgrenzen brennbar ist und aus geringfügigen Leckagen entweichen kann. Dem Wasserstoff kommt hier wegen der weiten Explosionsgrenzen ein besonders hohes Gefahrenpotential zu. Auch Gasbehälter (Propan, Butan, Erdgas) und die damit betriebenen Betriebsmittel können als Orte einer Leckage in Betracht kommen. Gase und Dämpfe mit höherer Dichte als Luft können sich an tiefer liegenden Stellen akkumulieren und so rasch zu einer explosionsfähigen Atmosphäre führen (z. B. im Schiffsrumpf, in Montagegruben). Die Errichtungsbestimmungen solcher Anlagen sind daher besonders sorgfältig einzuhalten.

Als technische Zündquellen kommen der heiße, bei hoher Beanspruchung häufig glühende Turbolader, der extrem belastete Abgaskrümmers, der Katalysator oder elektrische Funken in Betracht. Diese wirken während des Betriebs des Fahrzeugs; bei stillstehenden Fahrzeugen können die Nachhitze oder die unter Dauerspannung stehenden Teile der Elektrik brandursächlich werden. Auf die Problematik der Aufladung von Batterien ist gesondert zu verweisen, weil hier Wasserstoff freigesetzt werden kann und nicht hinreichend fixierte Ladekabel abrutschen und Lichtbögen zünden können.

Bei den meisten Fahrzeugen wird die Stromversorgung durch einen durch eine Lichtmaschine aufladbaren Akkumulator (umgangssprachlich: Batterie) bewerkstelligt, wobei der Plus-Pol mittels isolierter Leitungen zu den Verbrauchern geführt wird, während der Minus-Pol an der Karosserie befestigt ist (damit an allen leitfähig verbundenen Teilen). Die Spannung beträgt 6 V, 12 V oder 24 V, die Kapazität erreicht 100 Ah und mehr. Bei den meisten Fahrzeugen besteht in der Elektrik die Besonderheit, dass es zwei Strom-

versorgungsbereiche gibt; zum einen den mit Überstromschutzeinrichtungen (Sicherungen) geschützten Bereich und zum anderen den nicht überstromgeschützten Bereich, der Ströme bis zum Kurzschlussstrom der Batterie führen kann. Im Fall der Absicherung der abgehenden Leitungen zu den Verbrauchern wird der Strom nach einer Strom-Zeit-Kurve begrenzt, so dass die Fehlerleistung begrenzt bleibt und eine Brandzündung erschwert ist. Im Fall der nicht abgesicherten Leitungen (Bezeichnung 30, ggfs. 15) wird im Fehlerfall, das ist hier in der Regel ein Masseschluss, der Strom nur durch den (geringen) Leitungswiderstand, den geringen Innenwiderstand der Batterie und den Widerstand der Fehlerstelle begrenzt; dabei können Schweißströme auftreten, die entsprechende Spuren an der Plus- und Minusleitung und im Bereich der Fehlerstelle hinterlassen. Da solche augenfälligen Spuren häufig auch als Brandfolge entstehen, dürfen sie nicht in einem unzulässig verkürzten Eliminationsverfahren als zwingend brandursächlich dargestellt werden.

Werden die isolierten Leitungen mit unzulässig hohem Strom beaufschlagt, so erwärmen sie sich, zerstören die PVC-Isolierung, wobei deren Zersetzungsprodukte in Brand geraten können. Ein Spontanbrand eines Fahrzeugs ist dabei nicht zu erwarten. Damit verbunden ist eine starke Rauchentwicklung. Möglicherweise werden sogar Kupferadern durchtrennt. Ist die Isolierung so zerstört, dass eine Plusleitung mit der Karosserie (Minuspotential) kontaktiert, kann ein Lichtbogen gezündet werden, der auch Kupfermaterial verflüssigt (Schmelzpunkt 1.084 °C) und augenfällige Spuren hinterlässt.

Ein Masseschluss kann nicht nur durch Überlastung der Leitung, sondern auch durch Reibung, Erschütterung, Quetschung, Unfall oder Tierfraß auftreten. Auch bei unsachgemäßen Verdrahtungs- und andern Reparaturarbeiten können Schäden herbeigeführt werden. Auch thermische Belastung von außen, z. B. beim Reparaturschweißen, führt zur Schädigung der Isolierung. Auf die eingehende Beschreibung der diversen Schädigungsmechanismen durch Strom in Abschnitt 4.3.6.2 wird verwiesen.

Auch die elektrischen Verbraucher selbst können brandursächlich werden. Problematisch ist die zunehmende Elektrifizierung der Fahrzeuge in der Oberklasse, wo z. B. bis zu 100 Elektromotoren (Stellmotoren) eingebaut sind. Häufig sind auch komplizierte Schaltungen realisiert, so dass die Beiziehung der Schaltpläne des Herstellers für den jeweiligen Fahrzeugtyp notwendig wird, wobei selbst innerhalb kurzer Herstellungszeiträume Modifizierungen zu erwarten sind. Deshalb ist die Fahrzeugidentifizierungsnummer (FIN) in Erfahrung zu bringen.

Nicht übersehen werden darf die Nachrüstung von Komponenten und Zubehör (Anhängerkupplung, CD-Wechsler, GPS-Einrichtungen, Klimaanlage, Steckdosen, Zweitbatterie, Telefonanlage u. a.). Diese werden auch in Laienarbeit eingebaut, wodurch Schwachstellen und Überlastungen entstehen können. Das unbekümmerte Ersetzen von Sicherungen mit höherem Nennstrom führt zwangsläufig zur thermischen Überlastung der Leitung bzw. deren Isolierung.

Zur Untersuchung der Elektrik gehört auch die Feststellung, in welcher Betriebsstellung sich der Zündschlüssel oder die Wahlschalter befunden haben. Diese bestimmen nämlich weitgehend den Grad der Elektrifizierung eines Fahrzeugs. So können möglicherweise technische Brandzündungen elektrisch eingegrenzt oder sogar ausgeschlossen

werden. Im Brandschutt ist nach dem Zündschlüssel zu suchen, welcher häufig in den Resten des Zündschlosses eingeschmolzen vorliegt, um festzustellen, ob der Schlüssel-inhaber (Berechtigter) das Fahrzeug führte.

Bei Verkehrsunfällen kann es zu erheblichen Schäden an der Elektrik kommen. Dabei können erhebliche Fehlerströme auftreten, die brandzündend wirken. Wegen nicht abschließbarer Spätschäden ist nach Unfällen stets die Batterie zur Verhinderung von Folgebränden abzuklemmen. Man sollte sich dabei nicht auf die Maßnahmen der Feuerwehrr verlassen.

Im Innenraum steht die Elektrik im Vordergrund technischer Ursachen. Auch hier mündet die unabgesicherte Leitung 30 in den Armaturenbereich (Zündanlassschalter, Sicherungskasten). Mit zunehmendem Komfort sind dauerstromführende Leitungen vorhanden, die unabhängig vom Motorbetrieb eine Stromversorgung sicherstellen. Auch abgetrennte und nicht isolierte Leitungsenden stellen eine Brandgefahr dar, wenn Verbraucher im spannungslosen Zustand abgetrennt wurden, aber bei Motorbetrieb spannungsführend werden. Steckverbindungen können ihren Kontaktdruck verlieren und zu lokalen Überhitzungen führen. Schäden an der Elektrik kündigen sich in der Regel durch Rauchentwicklung (Pyrolyse des Isolationsmaterials) an und führen selten zur spontanen Entzündung.

Brände im Innenraum können durch Schweißarbeiten auch im Außenraum verursacht werden, indem die Schweißenergie durch Wärmeleitung nach innen geleitet wird. Auch der fehlerhafte Abbrand von Kraftstoff im Katalysator kann eine extreme Hitzeentwicklung im Katalysator und dessen Umgebung verursachen; die Innenspuren im Katalysator belegen diesen Schadensmechanismus.

Wegen der gegebenen Brennbarkeit der Innenausstattung wird bei vorsätzlicher Inbrandsetzung eines Fahrzeugs auch der Innenraum als Brandzündungsort gewählt; dabei wird darauf abgestellt, dass der Brandfortschritt so rasch erfolgt, dass der Zündort nicht mehr rekonstruiert werden kann. Die Feuerwiderstandsdauer der Spritzwand lässt aber häufig eine Eingrenzung des wahren Zündortes durchaus zu. Für einen Zerstörungserfolg im Innenraum ist von besonderer Bedeutung die Zuführung des Verbrennungssauerstoffes. Bei geschlossenem Innenraum ist ein Ausbranderfolg nicht mehr gegeben; häufig erstickt das Feuer infolge Sauerstoffmangels. Es ist deshalb genau zu prüfen, inwieweit Fenster, Türen oder Schiebedächer bewusst geöffnet waren, um den Ausbranderfolg herbeizuführen. Auch Verpuffungsspuren (Spaltmaß, unberußte Scheiben) sind zu beachten.

Im Kofferraum ist als Brandursache meist nur die Elektrik zu beachten. Vermehrt finden sich dort die Batterie und elektrische Zusatzeinrichtungen oder auch die Anschlusselektrik für den Anhängerbetrieb. Gelegentlich spielt hier auch die Abgasanlage eine Rolle, wenn sie fehlerhaft betrieben wird. Zu beachten ist, dass ein geschlossener Kofferraum die Sauerstoffversorgung weitgehend unterbindet. Meistens wird der Kofferraum sekundär aus dem Innenraum heraus in Brand gesetzt.

Im Bereich des Unterbodens befindet sich die Abgasanlage. Wenn Abstandsreduzierungen zum Fahrzeug-Unterboden vorgenommen oder Strahlungsschutzschilde entfernt

werden, erfolgt eine unzulässige Wärmeübertragung auf den Unterboden bzw. auf die aufliegenden Dämmungen und Matten. Auf die besondere Gefahr durch den Katalysator bei Zündstörungen im Motorraum und Eintrag von unverbranntem Kraftstoff wurde bereits verwiesen (Normalbetrieb 250 °C, Fehlerbetrieb > 600 °C außen). Auf die am Unterboden verlegten Kraftstoffleitungen ist jeweils gesondert zu achten.

In allen Fällen ist zu berücksichtigen, dass der Fahrtwind zu einer erheblichen Absenkung der Temperatur führt. Wird das Fahrzeug längere Zeit im Stillstand betrieben, so kommt es zu gefährlichen Überhitzungen der Abgasanlage. Bei Annäherungen an den Unterbodenschutz oder an die Bodengruppe kann so ein Brand gezündet werden.

Das Abstellen von betriebswarmen Fahrzeugen auf brennbarem Bewuchs oder auf Laubhaufen kann zur Inbrandsetzung des Stellplatzes führen. Entscheidend sind hier die Temperatur der Abgasanlage und deren Annäherung an Brennbares. Als besonders brandgefährlich erweisen sich die Katalysatoren wegen ihrer hohen Betriebstemperatur.

Bei Lagerschäden an den Achsen und bei Dauerbremsungen entsteht eine gefährliche Reibungswärme, die sich auf die Reifen und die Peripherie übertragen kann. Auch Anstreifungen von Reifen an Auf- und Anbauten und blockierte Reifen sind als brandursächlich bekannt.

Allgemein ist anzumerken, dass unfallbedingte Brandzündungen selten sind, weil gleichzeitig Kraftstoff austreten und in der Dampfwolke innerhalb der Zündgrenzen eine effektive Zündquelle wirken muss. Mit zunehmender Kollisionsgeschwindigkeit nimmt die Wahrscheinlichkeit einer Brandzündung aber zu, weil Schäden an den Versorgungssystemen, an der Elektrik und Schlagfunkengefahr im eng begrenzten Wirkungsbereich häufiger werden.

Bei Ausweitung des Brandes können fehlerhafte Leitungsverbindungen entstehen, die nicht nur zu Fehlerspuren, sondern auch zur zufälligen Inbetriebnahme beliebiger Verbraucher führen (Scheibenwischer, Hupe, Alarmanlage, Licht, Blinker u. a.). So ist auch nicht überraschend, dass sich Fahrzeuge in Bewegung setzen, wenn der Zündanlasser ohne Schlüssel brandbedingt überbrückt wird und der Anlasser bei eingelegtem Gang über das Getriebe die Räder antreibt. So kann es nicht nur zur Dislozierung eines Fahrzeugs kommen, sondern auch zur Verlagerung des Brandes z. B. auf Gebäude.

Für eine Inbrandsetzung bedarf es keiner besonderen zusätzlichen Brandlast, da an allen Stellen hinreichend brennbares Material zur Verfügung steht. Der Täter muss nur die Zündenergie zur Verfügung stellen. Um den Zünderfolg sicher zu stellen, wird aber häufig ein Brandbeschleunigungsmittel verwendet, das zu einer raschen flächenhaften Inbrandsetzung bei großem Flammenbild führt. Unter Berücksichtigung der Branddynamik eines normalen Fahrzeugbrandes kann hier bereits eine Vorentscheidung über den vermutlichen Einsatz eines solchen Hilfsmittels getroffen werden. In allen Fällen ist aber zu beachten, dass das Fahrzeug selbst solche Brandbeschleunigungsmittel freisetzen kann (Leitungsleckagen, Tankperforation, Überfüllungen, Reservekanister).

Hinzuweisen ist, dass sich in Kraftstofftanks und in Reservekanistern ein so genanntes überfettes Gemisch befindet (Konzentration > OEG), das keinesfalls explosibel abbren-

nen kann. Die in Filmen dargestellten Explosionsszenarien entsprechen nicht der physikalischen Realität. Ein Flammenmeer bildet sich nur bei offenen Flüssigkeiten.

Wegen der Typenvielfalt und der zunehmenden Kompliziertheit der Fahrzeugausstattungen empfiehlt sich in der Regel die begleitende Untersuchung eines Vergleichsfahrzeugs möglichst gleichwertiger oder gar gleichartiger Ausstattung. Auf die typabhängige und baujahrspezifische Ausstattung und auf Besonderheiten des konkreten Fahrzeugs ist hinzuweisen.

4.3.7.4 Brandverlauf an Fahrzeugen

Wie bei jedem Brandfall kommt dem Verlauf des Brandes eine besondere Bedeutung zu. Im Fall der Fahrzeugbrände gibt es einige Besonderheiten zu beachten, wobei die Reaktionsfähigkeit und das Brandverhalten der verbauten Materialien und auch Wärmeleitung, Konvektion und Wärmestrahlung die Dynamik bestimmen, aber auch konstruktive Eigenheiten eine nicht unwesentliche Bedeutung aufweisen. Explosionsartige oder sekundenschnelle Brandausweitungen entstammen dem Filmgeschehen und entsprechen nicht den branddynamischen Gesetzen. Nur bei Anwendung eines leicht flüchtigen Brandbeschleunigungsmittels ist eine sekundenschnelle Brandausweitung im Ausbringungsbereich realistisch.

Die Temperaturanstiegsgeschwindigkeit wird nämlich von der Art des Brandes bestimmt. Sie ist maximal bei einem Abbrand des Dampfes einer brennbaren Flüssigkeit, mäßig bei einem Abbrand fester Stoffe und ganz gering bei einem Schmelbrand oder bei Sauerstoffdefizit (s. Abb. 26). Damit wird auch die Geschwindigkeit der Brandentwicklung festgelegt, auf die später noch einzugehen ist.

Ein schlagartiges Übergreifen eines Brandes vom Motorraum auf den Innenraum, wie er gelegentlich behauptet wird, ist wegen der hohen Feuerwiderstandsdauer der Spritzwand nicht möglich. Experimentell wurden bei Altfahrzeugen Mindestdurchbrandzeiten von 8 Minuten festgestellt; bei modernen Fahrzeugen der oberen Mittelklasse sind Durchbrandzeiten von ca. 25 Minuten anzusetzen. Dieser zeitliche Verlauf ermöglicht immer die Bergung von Gegenständen aus dem Innenraum und dem Kofferraum. Auch die Personenrettung ist möglich.

Für die Beurteilung der von den Zeugen angegebenen Übertrittszeiten ist die Kenntnis der wahren Übertrittsintervalle besonders wichtig. Offene Motorhauben können diese Intervalle vergrößern. Ein Motorraumbrand führt zwangsläufig zeitverzögert zur Inbrandsetzung der benachbarten Reifen.

Der Übertritt des Brandes im Motorraum erfolgt mittelbar über die Spritzwand oder unmittelbar über Schwachstellen in der Spritzwand (Durchführungen). Der Erfolg eines sekundären Innenraumbrandes hängt dabei im Wesentlichen von der Belüftung des Innenraumes ab.

Erfolgt die Inbrandsetzung im Innenraum, dann bestimmt die Sauerstoffversorgung die Brandentwicklung, wie bereits ausgeführt. Im Regelfall erlischt der Brand bei geschlos-

sener Fahrgastzelle (Überdruck, Sauerstoffverbrauch). Es ist der Schließzustand der Fahrgastzelle zu prüfen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass in Folge des Brandes bei motorisch betriebenen Fensterhebern und Schiebedächern eine Veränderung des Schließzustandes während des Brandes nicht ausgeschlossen werden kann. Eine Überprüfung der Schaltung kann hier Klarheit verschaffen. Die in den Türhohlraum abgefallenen Glasreste und die Mechanik der Fensterheber können zur Klärung der vormaligen Stellung herangezogen werden. Ansonsten ist die Beurteilung des Lackschadensbildes sehr hilfreich.

Bei belüftetem Innenraum ist mit einer Brandausbreitung im Inneren innerhalb weniger Minuten zu rechnen. Die Brandhitze führt rasch zum Bersten der Scheiben und so zur effektiven Belüftung. Die Durchbrandzeiten zum Motorraum sind größer als die oben genannten Zeiten in Umkehrrichtung. Die Durchbrandzeiten zum Kofferraum sind wegen der sehr unterschiedlichen Konstruktion der Abtrennung sehr variabel.

Ein Brand im Unterbodenbereich kann zur Entflammung des Unterbodenschutzes oder zur Überhitzung der Bodengruppe führen. Der Brand wird in der Regel so in den Bodenbereich des Innenraumes verlagert. Eine Inbrandsetzung der hinteren Reifen führt ebenfalls zum Übergreifen auf den Innenraum bzw. den Kofferraum; die Entzündung der vorderen Reifen führt zu einem Motorraumbrand.

Erfolgt ein Abbrand eines Fahrzeugs in einer Garage, dann kann das Sauerstoffangebot reduziert sein mit der Folge eines verlangsamten Abbrandes. Andererseits führt ein Abbrand bei hinreichender Ventilation zu einer erheblichen Rückstrahlung von der Decke, was sich gerade bei Tiefgaragenbränden in besonders deutlicher Weise auswirkt. Dadurch kommt es auch bei geringen Abständen zu Nachbarfahrzeugen zu einem Feuerübersprung mit der Folge, dass mehrere Fahrzeuge brandbeschädigt werden und gelegentlich eine Differenzierung nach dem primär entzündeten Fahrzeug erschwert ist. Markante Betonabplatzungen geben dabei einen Hinweis auf den Ort des Primärbrandes.

4.3.7.5 Allgemeine Branddynamik in Fahrzeugen

Um zuverlässige Werte für die Brandzeiten zu erhalten, ist die spezifische Ausstattung eines Fahrzeugs zu beachten. Dennoch gibt es aus Realbränden und Experimenten abgeleitete charakteristische Zeiten, die als Beurteilungshilfsmittel geeignet sind. Im Zweifelsfall sind aufwändige Real-Brandversuche an einem zumindest typgleichen Fahrzeug durchzuführen.

So kann man bei heutigen Fahrzeugen auch ohne Kenntnis des realen Aufbaus der Spritzwand oder experimentell ermittelter Werte für die Durchbrandzeit vom Motorraum zum Innenraum ein Zeitintervall von deutlich über 10 Minuten unterstellen. Ein Totalausbrand eines PKW ist bei einer Brandzeit von wenigstens 45 Minuten zu beobachten. Bei völliger Zerstörung der Bereifung als Folgebrand erscheint eine Brandzeit von etwa einer Stunde angemessen. Ein Einzelreifen brennt in etwa in 30 Minuten ab, wobei ein Rest im Bereich der Aufstandsfläche (Latsch) erhalten bleibt. Ein vollständiger Innenraumbrand ist bei Belüftung in wenigen Minuten erreicht.

4.3.7.6 Vorsatztaten

Auf eine genaue und ausführliche Schadensmeldung und Zeugenvernehmung ist zu achten. Angaben sollten nicht nur beim Fahrer sondern auch bei den Mitfahrern eingeholt werden. Diese Angaben sind einer Plausibilitätsbetrachtung und einer sachverständigen Beurteilung nach dem Spurenbild zu unterziehen. Angaben zum Schadensablauf sind dabei unentbehrlich. Ein Abgleich der Angaben vor den Ermittlungsbehörden und den Sachversicherern ist empfehlenswert. Aus der Plausibilitätsbetrachtung aller Angaben können Verdachtsmomente abgeleitet werden.

Inbrandsetzungen können in der Regel wegen Einmaligkeit des Brandobjektes kaum geübt werden. Branderfahrene dagegen verfügen über Kenntnisse des Brandverlaufes, der Aufklärungsarbeit und eventueller Beurteilungen durch Sachbearbeiter oder Sachverständige. Bei Verdacht der Verwendung von Brandbeschleunigern ist auf Folgeschäden zu achten, z. B. auf unberuht weggeschleuderte Scheiben oder versengte Bodenflächen, auf Spaltmaßvergrößerungen an Türen, auf Behälter in der Peripherie, auf Spuren am Tatverdächtigen (Ruß, Hitzemerkmale an Haut, Haar und Fasern, Krähenfüsse im Augenwinkel). Das Asservieren von Proben zur Abgrenzung eventuell vorhandener Brandbeschleunigungsmittel von Betriebsstoffen und die Dokumentation der genannten, vergänglichen Spuren sind von hoher Bedeutung.

Auf Fremdmaterial und fremde Gegenstände ist zu achten. So sind Werkzeuge, die nicht zum Fahrzeug gehören, nicht nur auffällig, sondern können auf einen manipulativen Eingriff hinweisen. Auch Behälter in der Umgebung können als Transportbehälter von brandfördernden Flüssigkeiten in Betracht kommen. Reste von USBVs (kriminalistisch: Unkonventionelle Spreng- und Brand-Vorrichtungen- siehe Punkt 4.5.3) stellen einen eindeutigen Hinweis auf Manipulation dar.

Reste von Brandbeschleunigungsmitteln können sich an weniger thermisch belasteten Stellen auch nach einem Brandgeschehen erhalten, also in Hohlräumen, unter Belägen oder im Reifenlatsch. Auch in der Kleidung oder in/an Schuhen können Spuren erhalten bleiben. Diese Spurenträger sind getrennt und dampfdicht zu verpacken und chemisch-analytisch zu untersuchen (siehe Punkt 5).

Wegen der von leicht flüchtigen Beschleunigungsmitteln ausgehenden Verpuffungsgefahr werden gelegentlich Luntenspuren gelegt, um aus sicherer Entfernung eine Fernzündung zu ermöglichen. Solche Spuren finden sich am Boden, insbesondere im Bodenbewuchs. Auf die Möglichkeit einer USBV-Zündung (siehe Punkt 4.5.3) wird außerdem verwiesen, durch die auch eine zeitliche Distanz zur Brandzündung hergestellt werden kann.

Zur vollständigen Beurteilung ist auch nach Vorschäden und Reparaturen zu fragen. Dabei kann es erforderlich sein, mit Werkstätten Kontakt aufzunehmen, um fachkundige Angaben zu durchgeführten Maßnahmen zu erhalten. Soweit noch Schichtdickenbestimmungen an der Lackierung durchgeführt werden können, lassen sich damit Vorschäden feststellen. Ersatzteile von Fremdanbietern können Hinweise auf Reparaturen liefern.

Als frühe Zeugen kommen Passanten, Polizeibeamte oder Feuerwehrangehörige in Betracht, die auch Dokumentationen zur Verfügung stellen können, aus denen Schlüsse zur Branddynamik zu ziehen sind. Feuerwehrleute kommen als sachkundige Zeugen in Betracht; sie können Auskünfte zu den während ihres Einsatzes notwendigerweise durchgeführten Veränderungen am Fahrzeug geben.

Das Zurückweisen von Löschmaßnahmen kann auf die – unbegründete – Angst einer Verpuffung oder Explosion zurückgeführt werden, ist aber auch als gewollte Maßnahme der Herbeiführung eines Totalschadens zu interpretieren. Übliche Fahrzeuge brennen ab, aber stets ohne Explosionsereignisse.

Im Zweifel sind bei Fahrzeugbränden Sachverständige zuzuziehen. Dabei genügt es in der Regel nicht, auf die Fachkunde der Schadensgutachter zurückzugreifen. Eine sachgerechte Begutachtung ist nur durch speziell ausgebildete Brandsachverständige zu erwarten, die auch den Fahrzeugmarkt kennen.

Verschiedentlich wurden Fahrzeugbrände nach signifikanten Merkmalen ausgewertet, um ein Verdachtraster zu entwickeln. Dabei fällt auf, dass die meisten Inbrandsetzungen in der Dunkelheit, außerhalb von Orten, meist in einsamen Gegenden bei langen Alarmierungs- und Einsatzwegen und auf außergewöhnlichen Routen erfolgen. Es handelt sich um statistische Ergebnisse, die nicht unbedingt auf einen konkreten Fall anzuwenden sind.

Wertmindernde Vorschäden, nahender HU-Termin (§ 29 StVZO), demontiertes Zubehör, schlechtes Reifenprofil, bewusste Belüftung des Innenraumes, Entwendungsspuren, geleerte Kofferräume oder Handschuhfächer, bindende Leasingverträge oder unkonventionelle Versicherungen sind als Hinweise zu beachten. Auch Scheinverkaufsannoncen und nicht realisierte Verkäufe mahnen zur Vorsicht. Angebliche überhöhte Ankaufspreise sollen den Wert vorgaukeln, weshalb solchen Angaben nachzugehen ist. Das gilt insbesondere bei wertvollen Oldtimern. Streit unter Mitbenutzern und Schädigungsabsichten müssen beachtet werden. Auch sollte das Transportgut und dessen Versicherung überprüft werden.

Besondere Vorsicht ist geboten, wenn der Geschädigte rasch eine „plausible“ technische Brandursache anbietet. Es könnte sich hierbei um eine Kaschierung einer manipulierten Zündung handeln, die eine besondere Herausforderung an den Ursachenermittler darstellt.

4.3.7.7 Spuren an Fahrzeugen

Die Fahrzeugidentifizierungsnummer (FIN) stellt die eindeutige Zuordnung zu den Fahrzeugpapieren her. Es ist deshalb nach dieser FIN zu suchen, Sie ist an mehreren Stellen eines Fahrzeugs hinterlegt, teilweise auf Schildern oder in Stahl eingestanzt bzw. eingeprägt. Entsprechende Hinweise finden sich in Dateien und beim Hersteller. Bei den Prägnungen ist darauf zu achten, ob Manipulationsspuren vorhanden sind, welche mit metallographischen Ätzmethode sichtbar gemacht werden können.

Als Voraussetzung einer Begutachtung muss eine ausführliche Dokumentation der Tatortsituation gefordert werden. Frühe Lichtbildaufnahmen z. B. durch die Feuerwehr sind besonders hilfreich. Die Lichtbilder sollten in Farbe gefertigt werden. Die Dokumentation hat sich auf alle Bereiche des Fahrzeugs und die Umgebung des Fahrzeugs zu erstrecken. Alle diese dokumentierten Spuren sind bei der Fahrzeuguntersuchung zu überprüfen. Auf die aus dem Lackschadenbild und dem Abbrandzustand der Bereifung zu entnehmenden Schlüsse zur Branddynamik wird in diesem Zusammenhang besonders hingewiesen. Der Windeinfluss kann zur Modifizierung des Spurenbildes führen und ist bei der Beurteilung der Schadensspuren zu berücksichtigen.

Die Ausstattung des Fahrzeugs ist mit Hilfe des Kaufvertrags zu prüfen. Die Ausstattungsdetails können auch beim Händler und Hersteller ermittelt werden, weil sie dort für jedes Fahrzeug individuell gespeichert werden. Vorschäden sind zu überprüfen und abzuklären.

Die gesamte Fahrleistung ist, sofern noch möglich, festzuhalten. Dazu kann auch beim mechanischen Kilometerzähler die Rückseite der Anzeigeziffern herangezogen werden, wenn die dem Fahrer zugewandte Vorderseite brandbeschädigt sein sollte. Werkstattrechnungen oder ASU-Bescheinigungen können hierüber auch Aufschluss bieten.

In manchen Fällen ist geboten, die Wegfahrsperrung sachverständig zu prüfen. Hierzu bedarf es tiefergehenderer Kenntnisse der Funktionsweise dieser Anti-Diebstahleinrichtungen. Die Untersuchung dieser Sicherheitseinrichtung wird durch spezifisch ausgebildete Sachverständige (Elektroniker, Informatiker) vorgenommen.

Bei Verdacht auf Anwendung brandbeschleunigender Mittel sind spezifische Spurenbilder zu beachten, eine Vorprüfung mittels Geruchstest und mittels Photoionisationsdetektor vorzunehmen und eine chemisch-analytische Untersuchung durchzuführen. Auch der Standplatz des Fahrzeugs ist in die Untersuchung mit einzubeziehen. Eine Probenahme im Kies, Sand, Erdboden oder im Pflaster ist angeraten. Eine Entnahme von Neutralmaterial oder von Flüssigkeiten aus dem brandbetroffenen Fahrzeug ist gelegentlich erforderlich.

In allen Fällen ist kritisch zu prüfen, ob eine Verschleppung von brennbaren Flüssigkeiten möglich war. Eine Verlagerung von brandbeschleunigenden Mitteln könnte zur Fehlinterpretation der analytisch identifizierten Substanzen führen.

Die Suche nach dem Fahrzeugschlüssel kann von großer Bedeutung werden. Es lässt sich unter Umständen die Elektrifizierung des Fahrzeugs mit Hilfe der Schaltstellung im Zündanlassschalter rekonstruieren. Auch ist die Feststellung der Zahl der Schlüssel in einem Schlüsselbund möglich und über die Eigenschaften der einzelnen Schlüssel lassen sich weitere persönliche Informationen gewinnen.

Mechanische Verletzungsspuren an Türspalten geben Hinweise auf ein gewaltsames Eindringen. Alle Verformungen von Blechteilen sind zu untersuchen und von thermisch bedingten Verformungen abzugrenzen. Gerade thermische Verformungen von Blechteilen können wegen des Verlustes der Tragfähigkeit bei Temperaturen über 600 °C auffällig erscheinen, insbesondere wenn die Blechteile unter Auflast stehen (abgefallene Ge-

bäudeteile, Beladungen, sogar Eigengewicht). Verformungen oder mechanische Irregularitäten können in Zusammenhang mit der Entwendung des Fahrzeugs stehen, aber auch Vorschäden (Unfällen) zugeordnet werden. Auch die Lage der Glassplitter der Verglasung kann diesbezüglich einen Hinweis liefern.

4.3.7.8 Produktmängel

Bei Bränden von Fahrzeugen sind häufig die Versicherungen mit ihren Feuerversicherungen involviert. In diesem Fall ist die Untersuchung der Fahrzeugbrände auch unter dem Aspekt der Produkthaftung vorzunehmen. Diese Mängel sind vom technischen Versagen einer an sich bewährten technischen Komponente abzugrenzen.

4.3.8 Spezielle technische Brandursachen

4.3.8.1 Korrosion von Metallen

Korrosion stellt keine eigene Brandursache dar. Sie kann aber zur Zerstörung von mechanischen Aufbauten führen, in deren Folge erhebliche Schäden auch an der Elektrik, an Gasanlagen und an Feuerstätten u. a. herbeigeführt werden. Auch Rohre mit kritischem Inhalt können perforiert werden und so Flüssigkeiten oder Gase unkontrolliert austreten lassen, so dass sich Explosionen und Folgebrände anschließen können. Schaltkontakte können so beschädigt werden, dass ein erheblicher Übergangswiderstand entsteht und Steuerungen instabil werden oder versagen. Die Durchrostung von Abgasleitungen lässt nicht nur toxisches Kohlenmonoxid austreten, sondern führt zu Störung der Abgasführung und Verbrennung. Auch Ventile und Stellantriebe können betroffen sein, so dass deren bestimmungsgemäßer Gebrauch gefährdet wird und Folgestörungen oder Betriebsstörungen auftreten.

Es sind in der Technik viele Korrosionsarten bekannt, deren Besonderheit sich aus deren Namen ableiten lässt, wie

- Flächenkorrosion
- Spaltkorrosion
- Kontaktkorrosion
- Lochfraßkorrosion
- Spannungsrisskorrosion
- Schwingungsrisskorrosion
- Interkristalline Korrosion
- Unterwanderungskorrosion
- Hochtemperaturkorrosion

Alle diese Mechanismen, deren Details der Fachliteratur zu entnehmen sind, können für Schäden verantwortlich sein, die zu Betriebsstörungen, Ausfällen, Unfällen, Bränden und Explosionen führen. Die Beachtung von Korrosion ist daher eine wichtige Präventionsmaßnahme. Problematisch ist, dass die Korrosion nicht immer offenkundig ist, also latent verläuft und erst durch ein Schadensereignis bemerkt wird.

Vor allem so genannte unedle Metalle, die sich in unmittelbarem Kontakt mit dem Erdboden und/oder Wasser befinden, können durch die im Erdboden enthaltene Feuchtigkeit und andere Stoffe wie Säuren, Salze u. a. (aggressiver Erdboden) durch Elementbildung oder vagabundierende Ströme (Streuströme) korrodiert werden. Ein Korrosionsschutz durch Umhüllung ist häufig nicht durchführbar, da die vorgesehene Erderwirkung verloren ginge.

Metalle, die in einen Elektrolyten (stromleitende Flüssigkeit), wie z. B. mineralstoffhaltiges Wasser, eintauchen, lassen positive Ionen in den Elektrolyten übertreten und solche vom Elektrolyten zum Metall. Dabei gehen entweder die Metall-Ionen vermehrt in die Lösung oder die Ionen des Elektrolyten lagern sich vermehrt am Metall an. Im ersten Fall wird das Metall gegenüber dem Elektrolyten negativ, im zweiten Fall wird das Metall positiv gegenüber dem Elektrolyten.

In der Praxis ist bei einem gemeinsamen Einsatz verschiedener Metalle mit unterschiedlichen Metall/Elektrolyt-Potentialen in einem gemeinsamen Elektrolyten eine so genannte Elementbildung zu beachten, bei der zwischen den beiden Metallen (Elektroden) die jeweilige Potentialdifferenz gegen den Elektrolyten als Spannung abgegriffen werden kann; es liegt somit ein Volta- oder galvanisches Element vor. Werden die Elektroden elektrisch verbunden, fließt im Elektrolyten daher ein Strom von der negativen, unedleren Elektrode (z. B. Eisen, Zink) zu der positiven, edleren Elektrode (z. B. Kupfer). Die unedlere Metallelektrode gibt dabei positive Ionen ab und wird negativ geladen; die Anode wird aufgelöst. Die korrosive Abtragung des Materials erfolgt an der Übertrittsstelle des Stroms an den Elektrolyten. Die Korrosionswirkung kann durch äußere Einflüsse und in Rohranlagen durch das als Elektrolyt wirkende Medium eintreten.

Werden zwei Elektroden aus demselben Metall-Werkstoff in unterschiedliche Elektrolytkonzentration eingebracht und stehen die beiden Elektrolyte ionendurchlässig in Verbindung, dann bildet sich ein so genanntes Konzentrationselement, das eine Korrosionsgefährdung impliziert. In der Praxis ist dies der Fall, wenn z. B. die beiden Elektroden von unterschiedlichen Böden umgeben sind. Beispielsweise wirkt ein durch Beton und Erde verlegtes Metallrohr als Anode, wobei dieses durch Ionenübergang an den Elektrolyten zerstört wird. Der Grad der Korrosionsgefährdung hängt vom Werkstoff selbst und vor allem den chemischen Eigenschaften des Bodens ab. Die Elektrode im Elektrolyten mit der größeren Metallionen-Konzentration ist positiver als die andere. Bei Verbindung der beiden Elektroden fließt ein Strom und die elektrochemisch negativere Elektrode, das ist das Metall im Erdreich, löst sich auf.

Die Korrosionspotentiale von verschiedenen Metallen gegen eine Kupfer/Kupfersulfat-Elektrode sind beispielsweise wie folgt

Metall	Potential im Erdboden in V gegen gesättigte Kupfersulfatlösung	Elektrochem. Äquivalent in $\text{Kg A}^{-1} \text{y}^{-1}$	lineare Abtragrate in mm y^{-1} bei 1 mA dm^{-2}
Kupfer	0,0 V bis -0,1 V	10,4	0,12
Eisen	-0,5 V bis -0,8 V	9,1	0,12
Zink	-0,9 V bis -1,1 V	10,7	0,15

Mit dem elektrochemischen Äquivalent wird die Wirkung des Korrosionsstromes durch die Menge des aufgelösten Metalls pro Stromstärke in Ampere und Jahr ausgedrückt. Die Dichte des Korrosionsstromes bestimmt die schädigungsrelevante Abtragungsrate, weil entscheidend ist, ob ein flächiger oder punktueller Stromangriff vorliegt. Bei einer Stromdichte von 1 mA dm^{-2} ergeben sich die oben angegebenen linearen Abtragungsraten, die offensichtlich gering sind. Bei entsprechender Dauer können die Abtragungen durchaus gefährliche Größenordnungen erreichen.

Vielfach ist die Stromdichte nicht bestimmbar, so dass man auf Potentialmessungen zurückgreift. Am Beispiel eines im Sandboden verlegten verzinkten Stahlrohres und der Stahl-Armierung im Betonfundament können gegenüber der Kupfersulfatelektrode folgende Spannungen auftreten:

Armierungsstahl in Beton	-200 mV
verzinkter Stahl, verlegt in Sand	-700 mV

Es besteht also eine Potentialdifferenz von 500 mV. Werden die Potentiale außerhalb des Erdreiches verbunden, so fließt in der Verbindung ein Strom vom Armierungsstahl zum Stahl im Sand und im Boden ein Strom vom Stahl im Sand zum Armierungsstahl.

Wird die elektrische Isolation eines erdverlegten Stahlrohres lokal beschädigt und wird dieses mit einem Kupfererder verbundenen, so erfolgt an der zunächst kleinflächigen Schadensstelle ein Stromaustritt mit hoher Dichte. Die sich nunmehr einstellende lokale Korrosion wird die Wandstärke schwächen. Die Größe des Stroms hängt von der Spannungsdifferenz, von der Leitfähigkeit des Erdreiches und der durch die chemische Veränderung der Elektroden entstandenen Polarisierung der beiden Metalle ab. Die Polarisierung führt zu einer Veränderung der Spannung der Metalle gegen das Erdreich.

Es gilt also das Vorhandensein von metallischen und elektrolytisch leitend verbundenen Elektroden (Anoden und Kathoden) zu vermeiden, um die Bildung von Korrosionselementen (galvanische Elemente) zu verhindern. Da eine solche Trennung technisch oft nicht realisierbar ist, gewinnt der kathodische und anodische Korrosionsschutz (Opferelektroden) immer mehr an Bedeutung

In der Praxis bestehen Erderwerkstoffe in elektrischen Anlagen aus feuerverzinktem Stahl, der auch in Beton eingelegt werden darf. Fundamenterde, Erdungs- und Potenti-

alausgleichleitungen aus verzinktem Stahl dürfen in Beton mit Bewehrungsseisen verbunden werden. Für einen funktionierenden Potentialausgleich sind diese Bedingungen zu beachten.

Stähle mit Kupfermantel sind wie blankes Kupfer zu behandeln; Verletzungen des Kupfermantels sind aber problematisch für den Stahlkern (Korrosion durch Lokalelementbildung). Blankes Kupfer ist auf Grund seiner Stellung in der Spannungsreihe (0 bis +0,1 V) sehr beständig. Nur nichtrostende hochlegierte Edelmehle nach DIN 17440 (Nichtrostende Stähle; 9.2005 ersetzt durch DIN EN 10088-3), z. B. Stahl mit Werkstoffnummer 1.4571, sind im Erdboden passiv und korrosionsbeständig. Das freie Korrosionspotential in belüfteten Böden liegt in der Nähe des Wertes von Kupfer.

Beim leitenden Zusammenschluss von erdverlegten Metalleitungen und -rohren aus verschiedenen Werkstoffen wird das als Anode wirkende elektronegative Metall korrodiert. Die Korrosion ist von dem Verhältnis der kathodischen zur anodischen Fläche (A_k und A_a) abhängig. Ist der Quotient $A_k/A_a > 100$, ist mit stärkerer Korrosion zu rechnen. Der Werkstoff mit dem positiveren Potential wird zur Kathode. Ein Metallwerkstoff, der zur Anode wird, zeichnet sich durch das negativere Potential gegenüber der Kupfersulfatelektrode aus. Kathodisch reagieren in Böden also blankes Kupfer, verzinktes Kupfer, Kupfer mit Bleimantel und hochlegierter Stahl.

Wechselströme mit technischer Frequenz führen nicht zu Korrosion von im Erdboden verlegten blanken (unbeschichteten) Metallwerkstoffen. Gleichströme sind aber sehr gefährlich, weil sie einen Materialabtrag wegen Elektrolyse ermöglichen.

Um Potentialunterschiede auszugleichen, wird ein vollständiger Potentialausgleich aller Erder mit anderen mit der Erde in Verbindung stehenden metallischen Anlagen angestrebt, um ein Höchstmaß an Sicherheit gegen zu hohe Berührungsspannungen im Fehlerfall und bei Blitzeinschlägen zu erreichen.

4.3.8.2 Mechanische Überlastung

Unter mechanischer Überlastung versteht man allgemein eine Druck-, Zug-, Torsions-, Schwingungs- oder Biegebeanspruchung über die dem Werkstoff eigene Einsatzgrenze hinaus mit der Folge bleibender Schäden. Solche Beanspruchungen können auch durch unsachgemäße Dimensionierung von konstruktiven Teilen und Anlagen entstehen. Die Folgen sind mechanische Instabilitäten, Verschiebungen und Verformungen, die für eine technische Konstruktion abträglich sind. Im Folgenden sollen einige Schadensszenarien nur beispielhaft dargelegt werden.

Festsitzende Schraubverbindungen können so fest verbunden sein, dass die Schrauben oder Bolzen beim Lösen der Verbindung abgeschert werden, so dass vormals stabile Verbindungen gelöst werden. Unterdimensionierte Konstruktionsteile können unter bestimmungsgemäßer mechanischer Belastung versagen. Auch außergewöhnliche Auflasten, wie z. B. hohe Schneelasten, Wasser und Überladung, können die Auslegungsgrenzen übersteigen.

Als einfaches Beispiel einer mechanischen Überlastung sei die missbräuchliche Verwendung von elektrischen Leitungen erwähnt, an denen Gegenstände befestigt werden oder die als Seile missbraucht werden. Mechanisch beschädigte Leitungsisolierungen stellen wegen der sich entwickelnden Kriechströme ein besonders hohes Gefahrenpotential dar (siehe Punkt 4.3.6.2.1). Solche Überbeanspruchungen der elektrischen Isolierung oder der Leitungsadern können auch beim sorglosen Einziehen von Drähten in Installationsrohre auftreten, die dann sogar gefährliche Spätschäden begründen.

Der Winddruck, insbesondere bei Böen, stellt gelegentlich eine mechanische Überbeanspruchung dar, so dass Gebäude mit deren Infrastruktur beschädigt werden oder sogar einstürzen oder dass Strom- und Telefonmasten knicken oder umstürzen oder dass spannungsführende Leitungen oder Leiterseile abreißen und so brandgefährliche Erdschlüsse herbeigeführt werden. Schon ein unter Windeinfluss herbeigeführter Kontakt von unisolierten Strom-Freileitungen kann zu Lichtbögen und abfallenden glühenden Metallteilen führen.

Schadenfeuer, aber auch extreme Temperatureinflüsse können zu Längungen von Leitungen führen, die bei der technischen Auslegung nicht berücksichtigt werden. Brände führen zu erheblichen Dehnungen und Druckwirkungen in Baukonstruktionen. Stahlkonstruktionen können sich verformen oder total versagen. In allen Fällen führen diese Brandfolgen zur Instabilität der Baukonstruktion bzw. der Bauwerke. Verschärft gilt dies für die Folgen einer Explosion.

Auf das Abplatzen von Überdeckungen von Stahlbetonbewehrungen wurde andernorts schon eingegangen; solche Schäden führen zur Aufhebung der durch den pH-Wert des Betons bewirkten Passivierung des Stahls und damit zu dessen Korrosion. Absprengungen können auch die Tragfähigkeit von Mauerwerk schwächen.

4.4 Selbsterwärmungen und Selbstentzündungen

Selbsterwärmung bzw. Selbsterhitzung als Vorstufe der Selbstentzündung treten bei chemischen Prozessen auf, die in Abschnitt 4.2.1.1 besprochen werden. Im Folgenden werden die Selbsterhitzung in biologischem Material in Abschnitt 4.4.1 und die physikalische Selbsterhitzung in Abschnitt 4.4.2 behandelt.

Für alle diese Selbsterwärmungen gelten Grundprinzipien, welche insbesondere in den Abschnitten 1.4.2.9, 1.4.2.10, 4.2.1.1 und 4.4.1 angegeben werden.

4.4.1 Selbstentzündung von biologischen Stoffen

Die Selbsterhitzung und -entzündung von biologischen Stoffen wird häufig verkürzt als biologische Selbstentzündung bezeichnet. Die Selbsterhitzung wird durch biologische Prozesse gestartet, die sich chemische Veränderungen bis zur Zündung anschließen.

Die Selbsterhitzung bzw. -entzündung von Futtermitteln war Gegenstand vieler wissenschaftlicher Untersuchungen. Seit Beginn des 20. Jahrhunderts ist durch H. Miede be-

kannt, dass dabei Mikroorganismen, so genannte thermophile Bakterien (s. u.), eine entscheidende Rolle spielen.

Betroffen sind viele Futtermittel, wenn sie einen Mindestgehalt an Feuchtigkeit, an Nährstoffen wie Mineralstoffe und Vitamine aufweisen und relativ dicht gelagert sind. Wichtig dabei ist die Qualität des Bodens, der mit zunehmender Düngung die Vermehrung der Mikroorganismen begünstigt. Deshalb findet man Selbsterhitzungen im Heu, im Grummet, im Stroh, im Klee, bei Baumwolle, im Saatgut, im Getreide, im Sägemehl und anderen Naturprodukten, wenn der Lagerstapel hinreichend großvolumig und damit verdichtet ist und selbstverdämmend wirkt.

Die Wärmeproduktion erfolgt durch biologische, chemische und physikalische Prozesse. Es handelt sich jeweils um einen komplexen exothermen Prozess, der vielfach auf eine Kombination verschiedenster Abbauprozesse zurückzuführen ist, die in den Abschnitten 1.4.2.9 und 1.4.2.10 behandelt werden.

Hinsichtlich der biologischen Vorgänge werden drei überlappende Temperaturbereiche für das Wachstum der Mikroorganismen beschrieben:

5 °C	bis	27 °C	psychrophile Mikroorganismen
20 °C	bis	42 °C	mesophile Mikroorganismen
40 °C	bis	70 °C	thermophile Mikroorganismen

Die psychrophilen (kälteliebenden) Mikroorganismen sind in lebenden Pflanzen und auch noch in abgestorbenen Pflanzenteilen stets vorhanden, tragen bereits zur unkritischen Wärmerzeugung bei. In der Phase der Zellatmung vermehren sich in erster Linie mesophile (mittelwärmeliebenden) Mikroorganismen, beginnend im Temperaturbereich der psychrophilen Mikroorganismen (ab 20 °C). Durch die mit der Lagerung einhergehende thermische Verdämmung (Wärmestau) wird die freigesetzte Wärmeenergie akkumuliert, was zwangsläufig zur Erhöhung der Temperatur im Inneren eines Stapels führt. Dadurch vermehren sich die thermophilen (hitze liebenden) Mikroorganismen außerordentlich stark, während die mesophilen Organismen absterben.

Durch die Aktivität der thermophilen Mikroorganismen kann sich die Temperatur bis auf ca. 85 °C steigern, wo die ersten morphologischen Veränderungen im Stapelinneren stattfinden (Verkohlung der Zucker und Nährstoffe). Die dabei stattfindende Bildung von Braunheu bewirkt eine enorme Vergrößerung der spezifischen Oberfläche des Heus. Letztlich werden alle vegetativen Zellen zerstört.

An diese Phase der mikrobiologischen Aktivität schließt sich eine biochemische und chemische Phase an, die bei etwa 85 °C einsetzt und bis etwa 115 °C dauert. Im Fall von Heu entsteht mit zunehmender Temperatur Schwarzheu. Diese Phase kann durch Kompaktieren oder durch Abdestillation des Wassers gestoppt werden, was sich durch Volumenreduzierung des Stapels anzeigt (Einsenkungen).

Begünstigt durch anorganische Katalysatoren kann diese Phase aber zu einer weiteren Temperaturerhöhung führen, die mit „pyrophor“ (siehe Punkt 4.4.3) beschrieben werden kann. Hier kommt es zu sehr starken exothermen Reaktionen, so dass Temperaturen weit über 200 °C erreicht werden. Die Selbstentzündungstemperatur von Heu liegt typischerweise in der Gegend von 280 °C. Kann dem Stapel dann mehr oder weniger zufällig Verbrennungsluft in dieser erhitzten Zone zugeführt werden, kommt es zur Entzündung und es entsteht ein so genannter Glutkessel. Dieser kann sich über sich entwickelnde Brandkanäle bis zur Oberfläche ausdehnen und dort zu einem Oberflächenbrand führen.

Häufig wird der Temperaturverlauf in einem sich selbsterhitzenden Stapel in einem Diagramm dargestellt, in dem die Temperatur über der Lagerdauer in Tagen aufgetragen ist. Dort findet man dann fünf im Temperaturverlauf deutlich voneinander unterscheidbare Phasen:

biologische Phase	< 40 °C
mikrobiologische Phase	ca. 40 °C bis 75 °C
thermophile Zersetzungsphase	ca. 55 °C bis 85 °C
chemische Phase	ca. 85 °C bis 115 °C
pyrophore Phase	ca. 110 °C bis Selbstentzündung

In der Praxis trifft man häufig nicht einen solchen Idealverlauf an, weshalb eine präventive Überwachung so lange erforderlich ist, bis eindeutig ein Trend unter den unten angegebenen Sicherheitsgrenzwert von 60 °C erkennbar ist.

Am bekanntesten ist die Selbsterwärmung bzw. Selbstentzündung von Erntegut, wie Heu und Grummet, wenn es nicht hinreichend abgetrocknet eingelagert wird. Es gibt auch Fälle der Selbstentzündung als Folge der Durchnässung von trocken eingebrachtem Heu, sofern dieses noch hinreichende Nährwerte aufweist. Diese Zündung wird als Sekundärzündung bezeichnet. Es ist daher in diesem Fall zusätzlich die Dichtheit der Überdachung bzw. Regenschutzes zu prüfen.

Wiesenheu ist immer eine Mischung von Gräsern und Wildkräutern, wobei letztere teilweise schlechtere Trocknungsgrade bei dicken Stängeln und Blättern aufweisen können. Unterwuchs kann aber insbesondere bei abgetrocknetem Stroh zum Problem werden, wenn das Stroh für die Einlagerung auf verkrauteten oder vergrasteten Ertragsflächen gewonnen wird.

Begünstigt wird die Selbsterwärmung durch eine hohe Lagerdichte und den damit einhergehenden Innendruck; Mengen in der Größenordnung über 100 kg können brandkritisch werden. Stroh ist ebenfalls betroffen, aber in wesentlich geringerem Ausmaß.

Bei allen Lagerungen von Futtermitteln kommt es anfangs zu einer Erwärmung. Bei Heu erreicht der Stapel oder Stock durchaus Temperaturen bis 55 °C. Je nach Zustand kommt es zum Abklingen der Temperatur oder zu einem weiteren Anstieg, der zu einer Selbsterhitzung nach dem oben beschriebenen Schema führt.

Die Gefahr bei Heu oder Grummet beginnt gewöhnlich ab einer Lagerungszeit von mehr als 10 Tagen und kann bis zu mehreren Monaten bestehen. In Einzelfällen wurde aber bei Heu eine Selbstentzündung schon nach wenigen Tagen nachgewiesen. Eine Vorhersage des genauen Verlaufs der Selbsterhitzung ist nicht möglich, man beobachtet aber ein Häufigkeitsmaximum nach einer Einlagerungszeit von etwa 4 Wochen. Eine wirksame Gefahrenabwehr muss deshalb durch Beobachtung des Temperaturverlaufs und durch regelmäßige Temperaturkontrolle mittels der so genannten Heusonde (Heumesssonde) begleitet werden. Sie ist eine in das Erntegut einzustechende Lanze mit einem oder mehreren Thermofühlern. Merkblätter vieler Sachversicherer geben deutliche Hinweise zum Umgang mit Messsonden für Erntegüter.

Es ist nahe liegend, dass eine Messung an einer Stelle nie ausreichend sein kann, weil nur der zeitliche Verlauf der Temperatur an diesem Messort erfasst wird. Lokale Einzelmessungen sind sinnlos, da damit das Temperaturprofil eines Heustocks nicht erfasst wird und somit Selbsterwärmungszentren (Glutkessel) nicht entdeckt werden können. Es ist darauf hinzuweisen, dass die Selbsterhitzung durchaus auch in einem eng begrenzten Volumen eines großen Stapels stattfinden kann. Ein Messstellenplan ist immer den örtlichen Verhältnissen anzupassen. Aufzeichnungen über die Messstellen und die einzelnen Ergebnisse sind zur Beurteilung des Zustandes des Heustockes wertvolle Hilfsmittel und ein wirksames Nachweismittel.

Nur das Bewerten des Verlaufs der Temperaturen an mehreren Messstellen über längere Zeit ermöglicht die rechtzeitige Einleitung von gezielten Gegenmaßnahmen.

Als Frühindikatoren kommen der erwähnte Temperaturanstieg im Heustock über 60 °C, aber auch Einsenkungen des Heustocks, Schwitzen, Fermentations-, Tabak- oder Röstgeruch oder Rauch in Betracht. Nur die Temperaturmessung kann als zuverlässige Präventionsmaßnahme anerkannt werden, weil die genannten Indikatoren nicht zwingend auftreten. Häufig ist die Wahrnehmung von Geruch bereits ein Zeichen eines fortgeschrittenen Heustockbrandes. Das finale Ereignis ist das Auftreten eines Glutkanals nach außen, der in der Regel spontan in einen Flammenbrand umschlägt, der sich in der Regel an der Oberfläche rasch ausbreitet.

Temperaturen im Heustock (Heuvorrat, Heustapel) von 50 °C bis 60 °C sind also durchaus Warnwerte, die nach Fortführung der Temperaturmessung verlangen. Temperaturen von > 60 °C verlangen ohne Wenn und Aber nach der Zuziehung der Feuerwehr, um Maßnahmen des abwehrenden Brandschutzes fachkundig zu treffen, die als Heuwehr bekannt sind. Eine Temperatur von 70 °C ist auch für die Heuwehr als absolut kritischer Wert anzusehen.

Wird ein brandgefährlicher Heustock abgetragen, so beobachtet man eine zunehmende Dunkelfärbung des Heues in Richtung Heißzone als Folge eines Säureeinflusses. Typisch ist das Auftreten von Braunheu und im Zentrum gar von Schwarzheu, das von hohem Säuregehalt begleitet wird und deshalb auffällig scharf riecht. Schließlich stößt man auf so genannte Brandkanäle, die sich in nicht vorhersehbarer Weise innerhalb des Heustocks entwickeln konnten. Deren Ausbreitungsweg hängt von vielen Parametern des Heustock ab.

Handelt es sich um einen beginnenden Brand, so kann man volumenbegrenzte so genannte Glutkessel antreffen, in denen sich nur noch Asche befindet, die von Glut, Schwarz- und Braunheu umgeben sind. Beim Freilegen besteht die Gefahr des spontanen Aufflammens des Glutbrandes oder der Herbeiführung einer für die Heuwehr gefährlichen CO-Verpuffung mit einem Folgebrand im Lagergebäude.

Solche Prozesse werden auch in befeuchteten Strohlagern und in Anhäufungen von Sägemehl beobachtet, wobei ein hoher Dispersionsgrad die Selbsterwärmung begünstigt. Auch von Rübenschnitzeln und Getreide wird eine Selbsterwärmung gelegentlich berichtet.

Um eine Selbstentzündung von Erntegut nachzuweisen, sind Laboruntersuchungen unumgänglich. Hierzu ist das fragliche Erntegut zusammen mit Neutralproben schnellstmöglich zu asservieren; eine längere Liegedauer als 48 Stunden kann zu Verfälschungen des Ergebnisses führen. Die Probenentnahme hat an mehreren Stellen zu erfolgen, wobei Proben aus der näheren Umgebung des Glutkessels oder der Glutkanäle nicht verwertbar sind, weil nach den oben geschilderten Prozessen die Mikroorganismen zerstört sein dürften. Es sollen Proben nur mit allen nichtschwarzen Färbungen gesichert werden, wobei die heller gefärbten Proben viel entscheidender sind als die ganz dunklen. Nach dem Asservieren sind die meist vom Löschwasser befeuchteten Proben voneinander getrennt in gut belüfteter Umgebung zu trocknen, um die Infektion anderer Proben zu unterbinden und die Weiterentwicklung der Mikroorganismen zu stoppen. Die so vorbehandelten Proben werden am besten in Papiertüten mit entsprechender Beschriftung dem Labor zugeführt.

Der labormäßige Nachweis von thermophilen Mikroorganismen bzw. des Verhältnisses von thermophilen zu mesophilen Mikroorganismen bei Bebrütung ist für den Nachweis einer Selbstentzündung immer erforderlich. Im Labor werden die Proben auf ihre Keimzahl untersucht, um die Neigung zur Selbsterhitzung zu ermitteln. Ein positiver Nachweis darf aber nicht als Nachweis der Brandursache angesehen werden, es ist zusätzlich ein vollständiges Eliminationsverfahren durchzuführen, gerade dann, wenn alternative Ursachen erkannt werden. Außerdem besteht die Möglichkeit, dass in den Proben zwar thermophile Bakterien nachgewiesen werden, die eine Selbsterhitzung zwar als möglich erscheinen lassen, aber der Stapel sich vor der Zündung abgekühlt hat. Deshalb ist immer auch auf die anderen Zeichen einer Selbsterhitzung zu achten und eine hinreichende Zahl von Proben der Untersuchung zuzuführen.

4.4.2 Physikalische Selbstentzündung

Stoffe aus einer flüssigen oder gasförmigen Mischung werden reversibel an der Oberfläche fester Körper gebunden. Findet die Aufnahme im gesamten Porenvolumen des Körpers statt, so spricht man von einer Okklusion, während man eine Bindung von Molekülen des Gases oder Dampfes vor allem an inneren Oberflächen des festen Körpers als physikalische Adsorption (Physisorption) bezeichnet. Diese erfolgt unter der Wirkung der van-der-Waals-Kräfte zwischen Festkörper und Gas, Dampf bzw. Flüssigkeit. Je größer die innere Oberfläche des Festkörpers ist, desto mehr Stoff wird adsorbiert. Daher adsorbieren poröse Körper, bei denen die innere Oberfläche extrem groß ist (bis zu $1.000 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$) große

Mengen an Gasen und Dämpfen (Beispiel: giftige Gase in Atemschutzfilter, Aktivkohle zur Reinigung von Trinkwasser, Trinkalkohol u. a.).

Zur Terminologie der Adsorption seien ergänzend folgende Begriffe angeführt, die sowohl für die physikalische als auch chemische Adsorption gelten (Physisorption, Chemisorption):

Adsorbat	auf einem Körper angereicherte fremde Substanz
Adsorbens	Körper, auf dem das Adsorbat gebunden ist
Adsorption	Anreicherung bzw. Verdichtung von Teilchen an einer Oberfläche bzw. Grenzfläche eines Körpers in Mono- oder Multilag
Adsorptionsvermögen	Fähigkeit eines Stoffes, feste, flüssige oder gasförmige Substanzen festzuhalten
Adsorptionswärme	die bei einer Adsorption entstehende Wärme; meistens bei Gas/Festkörper-Adsorption

Bei niedrigen Temperaturen wird die Adsorption begünstigt. Bei höheren Temperaturen können somit Adsorbate durch Ausheizen des Adsorbens wieder entfernt und das Adsorbens somit weitgehend wieder vom Adsorbat befreit werden. Dies macht man sich auch bei Anreicherung von Kohlenwasserstoffen für die Zwecke der Analytik zu Nutze (siehe Punkt 5). Die physikalische Adsorption ist somit reversibel.

Bei jeder Gasverdichtung tritt eine Wärmeentwicklung auf; auch bei der Gasadsorption, die ja eine Verdichtung des Adsorbats auf dem Adsorbens darstellt. Die Wärmeentwicklung ist mitunter recht beträchtlich, sie wird als Adsorptionswärme bezeichnet und ist größenordnungsmäßig mit der Kondensationswärme vergleichbar. Sie kann solche Ausmaße annehmen, dass eine Selbstentzündung entstehen kann.

Dies tritt bei fein gemahlener Holzkohle oder so genannter Aktivkohle (Kohle mit extrem hoher innerer Oberfläche) ein, wenn sie in größeren Mengen gelagert ist und somit die Adsorption unter der Bedingung einer Selbstverdämmung erfolgt. Der Brand stellt sich sodann als Glimmbrand dar. Auch bei anderen Stoffen mit hoher innerer Oberfläche werden solche Prozesse beobachtet. Sehr fein-poröses Platin, Platinmohr oder Platinschwamm benannt, adsorbiert Wasserstoff so stark, dass es sich bis zum Glühen erhitzt und den Wasserstoff zündet (Döbereiner's Feuerzeug). Hiervon macht man bei der Zündpille zum Anzünden von Wasserstoffhaltigem Leuchtgas Gebrauch.

Bei einem teilmechanisch wirkenden Gasspürgerät wird durch die Erwärmung einer das Gas adsorbierenden Schicht, die auf einem Druckgefäß aufgebracht ist, in dem Gefäß ein Überdruck erzeugt, der zu Signalzwecken verarbeitet werden kann (Schlagwetteranzeiger).

Viele Körper, z. B. Pottasche (Kaliumkarbonat K_2CO_3), Chlorkalzium (wasserfreies Calciumchlorid $CaCl_2$), wasserfreies Natriumsulfat (Na_2SO_4), Phosphorpentoxid (P_2O_5 , P_4O_{10}), Schwefelsäure (H_2SO_4), Kieselgel und Zeolithe (Molekularsieb) adsorbieren bevorzugt den in der Luft befindlichen Wasserdampf und können somit zur Trocknung von festen Stoffen, Flüssigkeiten, Gasen und empfindlichen Geräten, z. B. im Labor im Exsikkator oder Trockenrohr, verwendet werden. Da es sich um langsam ablaufende Gleichgewichtsreaktionen handelt, spielt die Erwärmung eine untergeordnete Rolle. Bei unsachgemäßem Umgang sind aber Zündungen von zu trocknenden Substanzen nicht auszuschließen.

4.4.3 Pyrophore Stoffe

In Lexika findet man unter dem Begriff „Pyrophore“ (griechisch: Luftzünder, Selbstzünder) die Definition: „Körper, welche an der Luft so begierig Sauerstoff aufnehmen, dass sie durch die bei dieser Oxydation entwickelten Wärme ins Glühen geraten“. Allgemeiner wird in Meyers Lexikon die Definition angegeben: „allgemein Stoffe, die sich an der Luft bei gewöhnlicher Temperatur selbst entzünden“.

Im Gegensatz zur physikalischen Adsorption (Physisorption), wie sie in Abschnitt 4.4.2 behandelt wird, handelt es sich hier um eine chemische Adsorption (Chemisorption). Bei dieser Art der Adsorption wird das Adsorbat chemisch verändert, weshalb die Reversibilität, wie bei der Physisorption, meist nicht gegeben ist. Die Bindungsenergie ist, wie bei chemischen Bindungen allgemein zu erwarten, viel höher als jene der Physisorption. Außerdem erfolgt bei der Physisorption eine mehrlagige Adsorption, während sich bei der Chemisorption häufig nur maximal eine Monolage ausbildet.

Als *pyrophor* werden also chemische Stoffe bezeichnet, die fein verteilt schon bei Raumtemperatur heftig mit dem Luftsauerstoff reagieren, so dass an der Oberfläche eine chemische Verbindung aus dem Adsorbat und dem Adsorbens entsteht. Man bezeichnet sie auch als Pyrophore. Die bei dieser Oxidation freiwerdende Energie ist so hoch, dass die Stoffe glühen oder Feuererscheinung zeigen. Die durch die chemische Reaktion eintretende Wärmeentwicklung übertrifft in der Regel bei weitem jene der physikalischen Adsorption (Physisorption).

Im Gefahrgutbereich werden pyrophore Stoffe in die Unterklassen

- pyrophor organisch flüssig,
- pyrophor organisch fest,
- pyrophor anorganisch flüssig,
- pyrophores Metall,
- pyrophore Legierung, Metallkatalysator trocken,
- pyrophor anorganisch fest,

- pyrophor metallorganisch flüssig und
- pyrophor metallorganisch fest

eingeteilt, was die große Bandbreite solcher Stoffe beschreibt.

4.4.3.1 Beispiele pyrophorer Stoffe

Derartige Pyrophore sind z. B. Metallstäube, die bei möglichst niedriger Temperatur aus ihren Oxiden durch eine Reduktion mittels Wasserstoff hergestellt werden, wie Magnesium, Titan, Nickel, Kobalt, Eisen, Blei, Lanthanoide, Actinoide, aber auch Metalloxide in ihrer niedrigsten Oxidationsstufe (z. B. Manganoxydul, Uranoxydul) und manche Schwefelverbindungen, wie das Schwefelkalium, welches man im so genannten pyrophoren Zustand durch Verkohlen von Alaun mit Zucker oder von schwefelsaurem Kali mit Mehl erhält. Durch Glühen dieser Präparate wird eine außerordentlich feine Verteilung hergestellt, infolge derer sie dem Sauerstoff eine sehr große Angriffsfläche bieten. Reduziert man z. B. die genannten Metalle bei höherer Temperatur, so dass sie dichter werden, so sind sie nicht mehr pyrophor. Der aus Alaun dargestellte Pyrophor wurde 1711 von Homberg entdeckt (Hombergs Phosphor).

Der wohl meistverwendete Pyrophor ist eine Legierung aus ca. 70 % Lanthanoiden (Cer, Lanthan, Yttrium etc.) und 30 % Eisen. Er wird in älteren Feuerzeugen als Feuerstein verwendet. Der staubfeine Abrieb dieser Legierung, welche vom Reibstein beim Drehen abgetragen wird, entzündet sich an Luft und erzeugt die Funken. Bei neueren Feuersteinen wirkt dagegen die Reibungsenergie zündend.

Auch Nichtmetalle können Eigenschaften der Pyrophore besitzen, so z. B. weißer Phosphor und bestimmte Schwefelverbindungen. Weißer Phosphor entzündet sich fein verteilt an der Luft (Herstellung siehe Phosphor).

Ein Stoffgemisch, das aus Kaliumsulfid, Kaliumpolysulfiden, Kaliumthiosulfat und Kaliumsulfat besteht, und das durch das Zusammenschmelzen von Kaliumcarbonat (Pottasche) und Schwefel unter Luftabschluss bei 250 °C hergestellt wird, wird aus historischer Sicht als Schwefelleber bezeichnet. Schwefelleber wird in der Medizin zur Behandlung von Hautkrankheiten und zur Metallfärbung u. a. verwendet. Der reine Stoff ist erheblich pyrophor.

Pyrophore Stoffe finden sich häufig in Kriegswaffen, um als Nebeneffekt getroffene Ziele in Brand zu setzen, z. B. fein verteiltes Uran, Tantal, Zirkonium, Titan oder aus der Gruppe der flüssigen metallorganischen Verbindungen das Triethylaluminium (TEA). Derartige Brandmittel können als Nachfolger des Napalms angesehen werden und übertreffen dieses hinsichtlich der Abbrandtemperatur und der brandstiftenden Wirkung, da nach erfolgreicher Löschung meist augenblicklich eine Rückzündung einsetzt und sie mit Wasser explosiv reagieren.

4.4.3.2 Sonderfall pyrophorisierendes Holz / pyrophore Holzkohle

In der Brandursachenerforschung wird der Begriff „*pyrophor*“ und der daraus abgeleitete Vorgang der Überführung in den pyrophoren Zustand, nämlich „*Pyrophorisierung*“, in erweitertem Sinne verwendet. Holz ist bei Gebrauchstemperaturen also selbst nicht pyrophor. Die Anwendung dieser Begriffe entspricht der Definition bis auf die Randbedingung der Reaktion bei Umgebungstemperatur und erfolgt bei langandauernder thermischer Belastung zur Beschreibung des Zündverhaltens von Holz.

Holz ist pflanzlicher Herkunft und besteht aus Zellulose mit Anteilen aus Hemizellulose, Lignin, Harzen, Mineralien und Wasser. Zellulose ist ein langkettiges Makromolekül und in einem Anteil von 40 % bis 55 % enthalten. Hemizellulose ist ein kurzkettiges, verzweigtes Makromolekül und nur mit einem Anteil von 15 % bis 35 % vorhanden. Das Lignin befindet sich als Füllsubstanz im Zellulosegerüst und verursacht die Verholzung der Zellwände; im Nadelholz ist es mit 28 % bis 41 %, im Laubholz mit 18 % bis 25 % vertreten.

Diese Anteile variieren in den verschiedenen Hölzern erheblich. Zudem verändern sich die Eigenschaften des Holzes mit seinem Alter und seiner Nutzung. Daneben finden sich stark streuende Werte für die Wärmeleitfähigkeit, Heizwert, Dichte, spezifische Wärmekapazität, und Wärmeübergangszahlen. Es ist daher nahe liegend, dass es die Materialeigenschaft „Zündtemperatur“ nicht geben kann. Alle Tabellen, die nur einen Wert für einen Holztyp enthalten, vernachlässigen daher die große Bandbreite der Beschreibungsgrößen. Der angeführte Wert kann allenfalls als beispielhafter, weniger als typischer Wert herangezogen werden.

Es ist bekannt, dass ein bestimmtes Holz etwa bei 270 °C spontan gezündet werden kann; stammt dieser Wert aus einem Versuch, so gilt er nur für dieses konkrete Holz im konkreten Zustand. Wird dieses Holz über lange Zeit thermisch beansprucht, so verändert es sich derart, dass eine Entzündung bei wesentlich tieferen Temperaturen herab bis 120 °C beobachtet wird.

Allgemein kann festgestellt werden, dass jedes Holz bei langandauernder Erhitzung, manchmal über Jahre, Destillations- und Pyrolyseeffekte erleidet, so dass sich die Holzbestandteile zersetzen und in ein pyrolytisch verändertes Holzmaterial oder gar in Kohle überführt werden; dieses an Luft stark veränderte Holz oder die erzeugte Kohle können sich bei diesen mäßigen Temperaturen mit Hilfe des adsorbierten Luftsauerstoffes entzünden. Es handelt sich um einen durch Adsorption herbeigeführten Selbstentzündungsprozess, dessen Zündenergie durch die Adsorptionswärme bereitgestellt wird.

Es wird daher zunächst ein Glimmbrand (Glutbrand) gezündet, der sich bei entsprechender Versorgung mit Verbrennungsluft zu einem Flammenbrand entwickeln kann. Dieses an der Holzoberfläche an Luft teilpyrolysierte Holz oder die Verkohlungs-schicht bestehen im Sinne der erweiterten Definition aus pyrophorem Holz. Der während der langandauernden Erwärmung unterhalb der eigentlichen Zündtemperatur hervorgerufene sukzessive Übergang in diesen Zustand wird vereinfacht als Pyrophorisierung des Holzes bezeichnet. Von besonderer Gefährlichkeit ist dieser Mechanismus, weil er sich

vielfach nur durch eine Braunfärbung des Holzes und einer Zerkleinerung des Holzes anzeigt, ohne dass eine Verkohlung sichtbar wird.

Als Folge dieses äußerst komplexen und nicht befriedigend geklärten Effekts ergibt sich faktisch eine veränderte Zündtemperatur, so dass der Einbau von Holz bei länger wirkenden Temperaturen über 100 °C insofern problematisch ist, als eben dabei die Zündtemperatur (im eigentlichen Sinne die Selbstentzündungstemperatur) brandgefährlich absinkt, bis sie die Temperatur der schädigenden Wärmequelle erreicht und die Entzündung erfolgt. Die hierfür erforderlichen Beanspruchungszeiten, deren Kenntnis sehr hilfreich wäre, sind nicht abzuschätzen und machen den unkritischen Einsatz von Holz bei länger anhaltenden erhöhten Umgebungstemperaturen gefährlich.

Zum Tragen kommt der Effekt dieser Pyrophorisierung des Holzes zum Beispiel beim Betrieb von Saunananlagen, in denen nicht nur eine langandauernde Wärmebeanspruchung erfolgt, sondern sogar ein zyklischer Betrieb, so dass am Ende des Saunabetriebs jeweils Luftsauerstoff in der Abkühlphase adsorbiert wird. Ist in solchen Saunen der Regelthermostat bzw. der Sicherheitstemperaturbegrenzer nicht an der Stelle der maximal zu erwartenden Temperaturen angebracht, so besteht die nahe liegende Gefahr der Zündung des thermisch durch Konvektion und Wärmestrahlung modifizierten Holzes. In der nachfolgenden Skizze wird dieser Sachverhalt schematisch dargestellt.

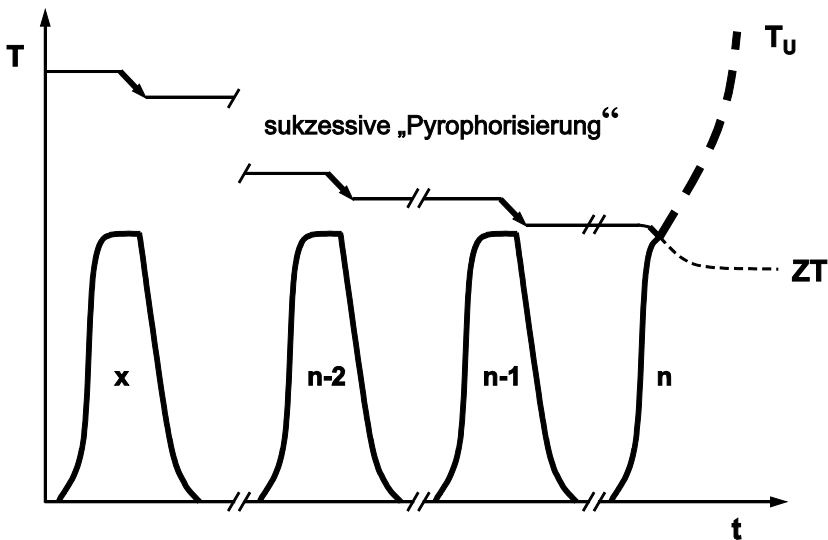


Abb. 26: schematischer Verlauf der Zündtemperatur ZT von Holz (Pyrophorisierung) und der Saunatemperatur T während des zyklischen Sauna-Betriebs (1 über x bis n-1) bis zur Zündung während des letzten Zyklus n mit nachfolgendem Brand (- - -, T_u)

Im Temperatur-Zeit-Diagramm sind beispielhaft mehrere aufeinanderfolgende Betriebszyklen aufgetragen; die Zeitachse ist dabei willkürlich gewählt und nicht zeitsynchronisierbar; die erforderliche Zahl n von Heizzyklen kann nicht angegeben werden. Bei der sukzessiven Holz-Pyrophorisierung sinkt die Selbstentzündungstemperatur ZT ab, so

dass nach längerer, nicht vorhersehbarer Zeit die Betriebstemperatur mit der abgesenkten Zündtemperatur des Holzes zusammenfällt und der Zünderfolg eintritt. Die Verzugszeiten bis zum Brandereignis reichen bis in den Zeitrahmen von vielen Jahren.

Heizungsrohre, die mit Dampf ($T > 100 \text{ °C}$) betrieben werden, können eine Holz-Pyrophorisierung herbeiführen, wenn sie mit Holz in Berührung stehen. Gleichartige Schäden können durch elektrische Leitungen, heiße Oberflächen oder Leuchten verursacht werden. Auch Warmwasser-Solaranlagen sind in der Lage, eine ähnliche thermische Belastung herbeizuführen. Balken, die unsachgemäß und vorschriftswidrig in Schornsteinwangen eingreifen, sind ebenfalls brandgefährdet, zumal innerhalb von Fehlböden auch noch ein Wärmestau wirksam werden kann (siehe Punkt auch 4.3.3).

4.4.4 Selbstentzündung des menschlichen Körpers (SHC)

In mittlerweile zahlreichen Artikeln wird von der spontanen Selbstverbrennung menschlicher Körper berichtet, die im englischen Sprachgebrauch als SHC (self human combustion) bezeichnet wird. Es wird als besonders merkwürdiges Phänomen beschrieben, da angeblich der menschliche Körper plötzlich ohne Zufuhr externer Energie entflammt werden soll, wobei Teile des Körpers und auch die Umgebung unverbrannt bleiben. Physikalisch und chemisch ist aber eine solche extrem schnelle und vollständige Verbrennung von Körperteilen nicht möglich. Allein der im Krematorium aufgewendete Energieaufwand zum Einäschern von Leichen widerspricht diesen angeblichen Beobachtungen.

Das Phänomen des Abbrandes von Körperteilen ist vielmehr auf eine Primärzündung der Kleidung zurückzuführen, die im Brandfortschritt nach Verflüssigung des Unterhautfettes als Docht wirkt. Das Brandverhalten bestimmt sich daher aus dem Dochteffekt. Das Fett kann auch teilweise verdampfen, so dass in der Umgebung der Brandleiche kondensiertes Fett beobachtet wird.

Die Wärmefreisetzung ist im Wesentlichen auf den Wirkungsbereich des Dochtabbrandes beschränkt, was die lokal begrenzte Zerstörung des Gewebes begründet und die geringen Schäden in der Peripherie erklärt. Gelegentlich kann der SHC-Effekt so wirksam sein, dass überraschenderweise sogar Knochen verascht werden. In einem konkreten SHC-Fall ist zum Beispiel nur ein eng begrenzter Bereich des Bauches teilverbrannt und der Oberschenkel scharf zonierte partiell verascht. Der Übergang zu den unverbrannten, nur hitzegeschädigten Hautarealen erfolgte innerhalb weniger Zentimeter.

Inzwischen liegen Analogie-Versuche zur fettunterstützten Körperverbrennung vor, indem die Verbrennung von bekleideten Versuchsschweinen studiert wurde (DeHaan). Das erzielte Spurenbild ist mit den Spuren an teilverbrannten Menschen konform.

4.5 Brandstiftung

Das Inbrandsetzen von Sachen und das teilweise oder ganze Zerstören von Sachgütern durch Brandlegung gehört nach dem deutschen Strafrecht zu den so genannten gemeingefährlichen Straftaten und wird als Brandstiftung bezeichnet. Im Strafrecht wird im

Bereich Branddelikte grob unterschieden nach Vorsatz und Fahrlässigkeit, Tätiger Reue und Herbeiführung einer Brandgefahr. Im Nachfolgenden sollen diese wichtigen Paragraphen des Strafgesetzbuches (StGB) zitiert werden.

§ 306 Brandstiftung

(1) Wer fremde

1. Gebäude oder Hütten,
2. Betriebsstätten oder technische Einrichtungen, namentlich Maschinen,
3. Warenlager oder -vorräte,
4. Kraftfahrzeuge, Schienen-, Luft- oder Wasserfahrzeuge,
5. Wälder, Heiden oder Moore oder
6. land-, ernährungs- oder forstwirtschaftliche Anlagen oder Erzeugnisse in Brand setzt oder durch eine Brandlegung ganz oder teilweise zerstört, wird mit Freiheitsstrafe von einem Jahr bis zu zehn Jahren bestraft.

(2) In minder schweren Fällen ist die Strafe Freiheitsstrafe von sechs Monaten bis zu fünf Jahren.

§ 306a Schwere Brandstiftung

(1) Mit Freiheitsstrafe nicht unter einem Jahr wird bestraft, wer

1. ein Gebäude, ein Schiff, eine Hütte oder eine andere Räumlichkeit, die der Wohnung von Menschen dient,
2. eine Kirche oder ein anderes der Religionsausübung dienendes Gebäude oder
3. eine Räumlichkeit, die zeitweise dem Aufenthalt von Menschen dient, zu einer Zeit, in der Menschen sich dort aufzuhalten pflegen,

in Brand setzt oder durch eine Brandlegung ganz oder teilweise zerstört.

(2) Ebenso wird bestraft, wer eine in § 306 Abs. 1 Nr. 1 bis 6 bezeichnete Sache in Brand setzt oder durch eine Brandlegung ganz oder teilweise zerstört und dadurch einen anderen Menschen in die Gefahr einer Gesundheitsschädigung bringt.

(3) In minder schweren Fällen der Absätze 1 und 2 ist die Strafe Freiheitsstrafe von sechs Monaten bis zu fünf Jahren.

§ 306b Besonders schwere Brandstiftung

- (1) Wer durch eine Brandstiftung nach § 306 oder § 306a eine schwere Gesundheitsschädigung eines anderen Menschen oder eine Gesundheitsschädigung einer großen Zahl von Menschen verursacht, wird mit Freiheitsstrafe nicht unter zwei Jahren bestraft.
- (2) Auf Freiheitsstrafe nicht unter fünf Jahren ist zu erkennen, wenn der Täter in den Fällen des § 306a
 1. einen anderen Menschen durch die Tat in die Gefahr des Todes bringt,
 2. in der Absicht handelt, eine andere Straftat zu ermöglichen oder zu verdecken oder
 3. das Löschen des Brandes verhindert oder erschwert

§ 306c Brandstiftung mit Todesfolge

Verursacht der Täter durch eine Brandstiftung nach den §§ 306 bis 306b wenigstens leichtfertig den Tod eines anderen Menschen, so ist die Strafe lebenslange Freiheitsstrafe oder Freiheitsstrafe nicht unter zehn Jahren.

§ 306d Fahrlässige Brandstiftung

- (1) Wer in den Fällen des § 306 Abs. 1 oder des § 306a Abs. 1 fahrlässig handelt oder in den Fällen des § 306a Abs. 2 die Gefahr fahrlässig verursacht, wird mit Freiheitsstrafe bis zu fünf Jahren oder mit Geldstrafe bestraft.
- (2) Wer in den Fällen des § 306a Abs. 2 fahrlässig handelt und die Gefahr fahrlässig verursacht, wird mit Freiheitsstrafe bis zu drei Jahren oder mit Geldstrafe bestraft.

§ 306e Tätige Reue

- (1) Das Gericht kann in den Fällen der §§ 306, 306a und 306b die Strafe nach seinem Ermessen mildern (§ 49 Abs. 2) oder von Strafe nach diesen Vorschriften absehen, wenn der Täter freiwillig den Brand löscht, bevor ein erheblicher Schaden entsteht.
- (2) Nach § 306d wird nicht bestraft, wer freiwillig den Brand löscht, bevor ein erheblicher Schaden entsteht.
- (3) Wird der Brand ohne Zutun des Täters gelöscht, bevor ein erheblicher Schaden entstanden ist, so genügt sein freiwilliges und ernsthaftes Bemühen, dieses Ziel zu erreichen.

§ 306f Herbeiführen einer Brandgefahr

(1) Wer fremde

1. feuergefährdete Betriebe oder Anlagen,
2. Anlagen oder Betriebe der Land- oder Ernährungswirtschaft, in denen sich deren Erzeugnisse befinden,
3. Wälder, Heiden oder Moore oder
4. bestellte Felder oder leicht entzündliche Erzeugnisse der Landwirtschaft, die auf Feldern lagern,

durch Rauchen, durch offenes Feuer oder Licht, durch Wegwerfen brennender oder glimmender Gegenstände oder in sonstiger Weise in Brandgefahr bringt, wird mit Freiheitsstrafe bis zu drei Jahren oder mit Geldstrafe bestraft.

(2) Ebenso wird bestraft, wer eine in Absatz 1 Nr. 1 bis 4 bezeichnete Sache in Brandgefahr bringt und dadurch Leib oder Leben eines anderen Menschen oder fremde Sachen von bedeutendem Wert gefährdet.

(3) Wer in den Fällen des Absatzes 1 fahrlässig handelt oder in den Fällen des Absatzes 2 die Gefahr fahrlässig verursacht, wird mit Freiheitsstrafe bis zu einem Jahr oder mit Geldstrafe bestraft.

Die juristische Fachliteratur hat in vielen Werken und Publikationen diese Strafrechtsparagrafen ausführlich interpretiert und erläutert. Auf diese Literatur kann hier nur verwiesen werden. Im Folgenden wird daher nur auf die fahrlässige und vorsätzliche Brandstiftung aus der Sicht der Brandursachenerforschung eingegangen.

4.5.1 Fahrlässige Brandstiftung

Bei einer fahrlässigen Brandstiftung erfolgt ein Auslösen des Brandes, ohne diesen Zünderfolg zu beabsichtigen. Dabei ist eine technische Zündung (siehe Punkt 4.1 bis 4.3) oder eine Selbsterwärmung (siehe Punkt 4.4) auszuschließen. Deshalb steht der Mensch im Fokus des Interesses, wenn er einen Brand durch aktives Handeln oder Unterlassen unwillentlich herbeiführt.

Dieses unbeabsichtigte menschliche Fehlverhalten ist nach dem Strafgesetzbuch strafbar, wenn der Verursacher aufgrund seiner Kenntnisse, seiner Ausbildung und seiner Erfahrung die möglichen Folgen voraussehen konnte und er trotzdem die gebotenen Vorsichtsmaßnahmen nicht getroffen hat. Dieses Fehlverhalten kann auch Vorgesetzten und Eltern vorwerfbar sein.

Im Folgenden sollen beispielhaft einige solche Fahrlässigkeiten erwähnt werden. Häufig trifft der Vorwurf zum Beispiel Raucher, die durch Tabakglut Brände verursachen. Auch die Nichtbeachtung von Rauchverbotszonen kann einen solchen Vorwurf begründen. Hier sei nur an das Rauchen im Bett oder auch bei Übermüdung erinnert. Handwerkern wird bei gefahrgeneigten Arbeiten, wie Trennschleifen, Löten, Schweißen, Bitumenschweißarbeiten, nicht selten der Vorwurf der fahrlässigen Brandstiftung eröffnet. Weiterhin besteht kein

Zweifel, dass der Betrieb von Feuerstätten ein erhebliches Maß an Umsicht erfordert, wobei die daraus resultierende Gefahr häufig unterschätzt wird. Auch Kerzen, welche unbeaufsichtigt abbrennen, stellen eine latente Brandgefahr dar. Das Verdämmen von kalten Wärmegegeräten durch Ablegen von Kleidung, z. B. auf Ölradiatoren oder Saunaöfen, wird ebenfalls brandgefährlich, wenn später der Thermostat Wärmeenergie anfordert; dieses Fehlverhalten führt immer zu einem Strafvorwurf. Auch das sorglose Benutzen von brennbaren Flüssigkeiten oder Klebern mit Lösungsmitteln in der Nähe einer effektiven Zündquelle ist im Fall der Auslösung einer Verpuffungsreaktion als Herbeiführung einer Explosion und gegebenenfalls als fahrlässige Brandstiftung zu werten.

Die Möglichkeiten einer fahrlässigen Brandstiftung sind sehr groß und ergeben sich eben aus dem Vorwurf, sachbezogene Handlungen fehlerhaft durchgeführt zu haben. Dabei sei an die nicht normengerechte Errichtung von elektrischen Anlagen, der mangelhaften Reparatur von elektrischen Betriebsmitteln und die unterbliebene Wartung erinnert. Auch bei zu beaufsichtigenden Geräten kann bei Zündung eines Brandes Fahrlässigkeitsvorwurf erhoben werden; das kann bei einer Industrieanlage zutreffen, aber ebenso im privaten Bereich (unsachgemäßes Betreiben von Kerzenlicht oder Radiatoren).

Das unsachgemäße Verwahren von Streichhölzern und Feuerzeugen animiert gelegentlich Kinder, Feuerexperimente durchzuführen. Die Eltern werden im Rahmen ihrer Aufsichtspflicht letztlich für das möglicherweise entstandene Schadenfeuer verantwortlich gemacht. Auch das Löschen eines Fettbrandes mit Wasser wird als Fahrlässigkeit einzustufen sein, da die damit verbundene Explosions- und Brandgefahr als allgemein bekannt erachtet wird. Das Unterlassen von Überprüfungen, beispielweise der Temperaturmessung in einem Heustock bzw. -stapel, wird als fehlerhaftes Unterlassen gewertet.

Wie schon an anderen Stellen ausgeführt, besteht eine große Herausforderung bei vom Tatverdächtigen eingestandener Fahrlässigkeit oder eingeräumtem Unterlassen, um eine Vorsatztat zu verdecken. Der Täter stellt dabei auf das aus seiner Sicht geringere Übel ab, um zumindest in den Genuss von Versicherungsleistungen zu gelangen.

4.5.2 Vorsätzliche Brandstiftung

Unter einer vorsätzlichen Brandstiftung versteht man das willentliche und schädigende Inbrandsetzen. Dabei kann es sich um eine Eigen- wie auch um eine Fremdbrandstiftung handeln. Vorsätzliche Brandstiftungen sind als kompliziertes Verbrechen einzustufen und schwierig zu verfolgen, da die Beweislage meist nicht so offenkundig ist wie z. B. bei Tötungen. Es ist daher jedes Brandereignis wie eine vorsätzliche Brandstiftung bis zum Beweis des Gegenteils zu bearbeiten, weil nur so das Eliminationsverfahren vollständig und korrekt eingesetzt wird.

Die sachverständige Feststellung bzw. der Nachweis einer vorsätzlichen Brandstiftung basiert beispielsweise auf

- dem Ausschluss einer dem menschlichen Handeln entzogenen Brandursache
- dem Nachweis eines Brandlegungsmittels
- dem Nachweis spezifischer Spuren

- der Verwendung einer Brandvorrichtung (USBV, Molotow-Cocktail)
- dem Nachweis einer vorgetäuschten technischen Ursache
- dem Nachweis von mehreren zeitgleichen Brandherden.

Dabei steht der eindeutigen Aufklärung einer Brandstiftung die brandspezifische Spurenerstörung entgegen; der Brand zerstört den Beweis eher als dass er ihn erzeugt. Da der Anteil der Vorsatztaten bei etwa 50 % der Brände liegt, besteht bei den hohen Schadenssummen und der Gefahr der gesundheitlichen Beeinträchtigung und des Todes Unbeteiligter ein hoher Aufklärungsbedarf.

Gelegentlich ergibt sich ein Hinweis aus Aufbruchspuren oder aus Mehrfachbränden im gleichen Objekt oder beim gleichen Geschädigten. Explosionsspuren lassen auf die Verwendung eines Brandbeschleunigungsmittels schließen. So ist unberuhten Glasscherben, die vom Brandobjekt weggeschleudert wurden, ein hoher Beweiswert im Hinblick auf eine dem Brand vorausgehende Raumexplosion beizumessen. Auch aus den Objekten entnommene wertvolle oder persönliche Gegenstände begründen einen Tatverdacht. Auch das auffällige Verhalten von Geschädigten oder Helfern ist regelmäßig zu prüfen; dies gilt insbesondere für Erstzeugen und auch für übereifrige Feuerwehrangehörige und Helfer.

Ist der Nachweis einer Brandstiftung ohnehin schon sehr schwierig, so ist der Nachweis der individuellen Täterschaft um ein Vielfaches schwieriger. Kriminologen behaupten daher, dass die Überführung eines Brandstifters schwieriger sei als die eines Mörders.

Bei den Tätern wurden unterschiedlichste Motive in verschiedensten Kombinationen festgestellt; so werden beispielsweise als Motive ermittelt:

- Versicherungsbetrug
- Kraftstoffteuerungen (Ölkrise)
- zu hoher Verbrauch an Treibstoff
- monatlich wiederkehrende Zahlungen
- Leasingverträge
- unvorhergesehene Einkommensverluste
- Arbeitslosigkeit
- geschäftliche Probleme
- Spielschulden
- Funktionsstörungen an Anlagen
- hohe Reparaturkosten
- Überalterung von Anlagen
- häusliche und partnerschaftliche Probleme
- psychische Belastungen und Erkrankungen
- Geltungssucht
- Einschüchterung
- Schutzgelderpressung
- Drohung
- Wettbewerbsausschaltung

- Verbrechensvertuschung
- Diebstahl
- Handelsbeschränkungen
- Störungen des sozialen Umfeldes im Privaten wie im Arbeitsleben
- und viele andere.

Nach einer Klassifizierung des „National Center for the Analysis of Violent Crime“ sind sechs Hauptmotive zu nennen:

- 1 Gewinnsucht, Profit; Betrug
- 2 Vandalismus, Kinderbrandstiftung
- 3 Erregung, Aufmerksamkeit, Anerkennung
- 4 Rache
- 5 Verbrechensvertuschung
- 6 Extremismus, Sozialprotest, Terrorismus

Diese Klassifizierung ist von verschiedensten Autoren überarbeitet und verfeinert worden. Man kann zusammenfassend feststellen, dass es den typischen Brandstifter nicht gibt. Nur bei den Mehrfachbrandstiftern scheint sich ein Täterprofil zu bewahrheiten.

Die Vorgehensweise der Täter lässt sich systematisieren:

- als spontane Handlung mit Anwesenheit des Täters am Zündort,
- als zeitverzögerte Handlung unter Benutzung technischer Vorrichtungen und Schaffung eines Alibis
- als manipulierte Handlung, bei der Unterlassen oder Fehlhandlung eingeräumt oder vorgeschoben wird.

Bei der Untersuchung von Brandorten ist auf nicht brandbezogene Spuren zu achten. Das können Reifenspuren oder Einbruchswerkzeugspuren sein, aber auch Schuhabdrücke, aber insbesondere nicht zum Objekt gehörende Behälter am Objekt oder in dessen Umgebung. Wenngleich diese Spuren möglicherweise nur Gruppenmerkmale liefern, so sind sie zur Einengung eines Täterkreises wertvoll.

Der Individualnachweis muss an Hand von Spuren direkt am Tatverdächtigen geführt werden; solche Spuren sind beispielsweise

- Verbrennungen der Haut (Erythem bis Verbrennungen 3. Grades)
- Krähenfüsse an den Augenwinkeln
- Versengung von Haaren

- Schmelzspuren oder Anseugung von Kleidungsfasern
- Reste von Brandbeschleunigungsmitteln an Kleidung, Schuhen, Handschuhen
- Rußanhaftungen
- ortsspezifische Spuren, wie Übertragungsspuren

In seltenen Fällen verbleiben am Brandort täterspezifische Spuren, die zur Einengung des Verdächtigenkreises führen. Als besonders erfolgreich erweisen sich natürlich molekular-genetische Spuren (genetischer Fingerabdruck, DNA-Identifizierungsmuster) sowie daktyloskopische Spuren (Finger- und Handabdrücke), sofern sie nicht brandzerstört sind.

Bei dringendem Tatverdacht kann im Rahmen der gerichtlich verfügten Hausdurchsuchung nach weiteren Spuren bzw. nach Tatmitteln gesucht werden. Eine Alibiüberprüfung und eine Prüfung der wirtschaftlichen und familiären Hintergründe und der Versicherungsverhältnisse gehört zu den Routineaufgaben.

Eine besondere Täterpersönlichkeit stellt der Serienbrandstifter dar. Für ihn gibt es keine anerkannte Definition, da hierzu zu wenig Forschungsarbeit investiert wurde. Vielleicht genügen zur Beschreibung folgende Randbedingungen:

- Folge von mehr als zwei Branddelikten
- in einem räumlichen und zeitlichen Zusammenhang
- mit jeweils eigenem Tatentschluss
- durch einen Täter oder eine Tätergruppe

wie kürzlich vorgeschlagen (Jäkel, Sommer, Wirth). Auf den modus operandi ist in besonderer Weise zu achten, weil sich daraus Erkenntnisse im Hinblick auf einen Serienbrandstifter ergeben können.

So sind übereinstimmende Methoden des Eindringens in ein Brandobjekt, die Benutzung bestimmter oder auffälliger Brandlegungsmittel, die Bevorzugung eines gleichen Ortes für die primäre Zündung, vergleichbare Tatzeiten und Örtlichkeiten und auch ein eng begrenzter Tatortraum mögliche Hinweise auf eine Serienbrandstiftung. Auch sich fortentwickelnde bzw. verbesserte Methoden der Inbrandsetzung sind in diesem Sinne auffällig. Nicht unberücksichtigt darf die Eskalation des Schadensausmaßes bleiben.

Es ist zu hoffen, dass mit der Auswertung des modus operandi und vor allem der Spuren ein Ermittlungsansatz geschaffen werden kann. Die Methode der Operativen Fallanalyse (OFA) bedient sich der Indizien, Spuren und der Umstände der Brandstiftung, um auf das Verhalten des Brandstifters zu schließen und Muster der Tatbegehung zu erkennen. Im Vordergrund steht daher nicht der psychologische soziologische, sondern der kriminalistische Ansatz. Insofern sind die häufig gebrauchten Begriffe des Profiling bzw. des Profilers nicht ganz korrekt, denn diese fokussieren sich auf die Psychologie des Täters. Erfolgreiche Arbeit leisten also die Operative Fallanalyse (am.: criminal investigation analysis) bzw. der Fallanalytiker, die fallweise Experten anderer Wissenschaftszweige (Psychologie, Soziologie, Ökonomie, Medizin) heranziehen.

Die Methode der Operativen Fallanalyse ist bezüglich der Brandstiftung relativ neu, so dass entsprechende Ansätze noch fehlen. Letztlich könnten daraus neue Ermittlungsansätze und Präventionsmaßnahmen abgeleitet werden.

4.5.3 Unkonventionelle Spreng- und Brandvorrichtungen (USBV)

Unkonventionelle Spreng- und Brandvorrichtungen (USBV) sollen dem Täter die Zündung aus sicherer Entfernung zu einem von ihm vorherbestimmten Augenblick oder vorherbestimmten Ereignis ermöglichen. Dadurch kann er sich ein vollständiges Alibi verschaffen, sofern er in der USBV keine täterspezifischen Spuren hinterlässt. Er hat sich hierfür eine funktionstüchtige Apparatur zu beschaffen, die im einfachsten Fall eine Kerze sein kann, aber auch ein Selbstzündungsmechanismus oder eine Apparatur unter Ausnutzung einer beliebigen physikalischen Größe (Temperatur, Helligkeit, Druck, Feuchte o.a.) oder das Ergebnis einer chemischen Reaktion. Hierfür gibt es zahlreiche Sensoren und Auswerteelektroniken. Der Zünderfolg tritt ein, wenn die Vorrichtung zeitverzögert das initiale Brand- oder Sprengmittel zündet und im Fall der Brandstiftung die Mindestzündenergie an die brennbare Umgebung übertragen wird.

Die Vorrichtung kann so gebaut sein, dass sie auffällig ist und auf eine vorsätzliche Inbrandsetzung hinweist, sie kann aber auch so gestaltet sein, dass sie sich dem Nachweis entzieht und durch eine vordergründige technische Ursache kaschiert wird. Im letzteren Fall kann es daher zu einer fehlerhaften Feststellung der Brandursache kommen. So könnte z. B. ein in unmittelbarer Nähe zu einer Elektroverteilung durch eine USBV erzielte Brandstiftung einer technischen Ursache, dem Fehlerstrom, zugeschrieben werden oder eine sichere Entscheidung unmöglich gemacht werden. Es sind deshalb dem Eliminationsverfahren entsprechend (siehe Punkt 3.1) alle alternativen Spuren zu berücksichtigen, indem hier der Brandschutt genauestens inspiziert wird. Wissentliche Selbsterwärmungsvorgänge könnten als Fahrlässigkeit dargestellt werden. Das auffällige demonstrative Ablegen einer oder gar mehrerer USBV kann eine Eigenbrandstiftung verschleiern.

Bei der durch eine USBV erfolgten Brandzündung muss unterstellt werden, dass sich der Täter Tatmittel beschafft hat, die er möglicherweise auch nach dem Brand noch in seinem Gewahrsam hat. Möglicherweise finden sich auch noch Bauanleitungen. Beim Nachbau einer Vorrichtung ist häufig keine technische Begabung, sondern nur Sorgfalt vonnöten. Die aus Terrorkreisen stammenden Bauanleitungen sind sehr präzise und enthalten sogar Hinweise auf fachgerechtes Lötten. Die einfachsten USBV beinhalten wenige Fehlermöglichkeiten und werden daher bevorzugt. Als USBV lassen sich aber auch technische Einrichtungen in Betriebsabläufen umfunktionieren. So können etwa Tauchsieder oder Wärmegeräte missbräuchlich verwendet werden. Moderne elektronische Schaltungen und Telefone können zu Zeit- und Fernschaltungsmaßnahmen missbraucht werden.

4.5.4 Verbrennung des Menschen

Bei der Selbstverbrennung übergießt sich der Mensch mit einem Brandbeschleunigungsmittel und zündet die Dämpfe selbst an. Häufig geschieht dies in suizidaler Absicht oder als Ausdruck des öffentlichen Protestes. Nicht selten wird deshalb ein öffentlicher Platz gewählt, um die Aufmerksamkeit auf sich zu ziehen. Bekannt ist in diesem Zusammenhang die Selbstverbrennung des Jan Palach im Jahre 1969.

Das Übergießen oder Anspritzen mit Brandbeschleunigungsmitteln erfolgt aber auch als Vorsatztat, um andere zu schädigen oder gar um ein Tötungsdelikt zu verschleiern. Hier ist die Analyse des Schadensbildes am Menschen, seiner Bekleidung und am Tatort von großer Bedeutung, um die Handlungsweise zu rekonstruieren.

Es handelt sich dabei um eine qualvolle Todesart, weil der brennende Mensch erhebliche Schmerzen bei vollem Bewusstsein ertragen muss. Allerdings geraten viele Menschen in einen Schockzustand und können dennoch Angaben zum Geschehensablauf machen, bevor sie medizinisch behandelt bzw. ins Koma versetzt werden. Sterben Personen innerhalb eines Brandgeschehens (Brandleichen), so kann vor dem Tod wegen der Intoxikation mit Kohlenmonoxid eine Bewusstlosigkeit eintreten. Eine rechtsmedizinische Untersuchung erscheint erforderlich zu sein.

Wegen der geringen Wärmeleitfähigkeit der Hautschichten erfolgt der Wärmeübergang weitgehend direkt in die obersten Schichten der Haut, so dass das Gewebe rasch zerstört wird. Die Überlebenschance hängt vom Ausmaß der Brandverletzungen ab. Je jünger der betroffene Mensch ist, desto wahrscheinlicher verlaufen die Brandverletzungen tödlich.

Bei Erwachsenen wird die so genannte 9er-Regel angewendet. Mit ihr kann ermittelt werden, wie viel Oberfläche des Körpers (in %) verbrannt ist (Verbrennungsgrad 2b oder 3).

Körperregion	9er-Regel	Erwachsener	Kind
Kopf, Hals	1 x 9 %	9 %	16 %
Arme	2 x 9 %	18 %	18 %
Rumpf	4 x 9 %	36 %	32 %
Beine	4 x 9 %	36 %	34 %
<i>Summe 9er-Regel</i>	11 x 9 %	99 %	100 %

Neben der Hautzerstörung kann es auch zum Kreislaufschock (Hitzeschock) kommen oder verzögert zu entzündlichen Reaktionen im Körper oder zum Versagen von Organen (Nierenversagen) mit Todesfolge. Von großer Bedeutung ist die abbrandbedingte Inhalation von Heißgasen. Sie kann das Lungengewebe zerstören und so tödlich wirken. Bei Leichen sind bei der Obduktion die Atmungsorgane zu untersuchen, um vitales Einatmen von Rußpartikeln nachweisen zu können.

4.6 Bauliche Mängel

Mängel sind alle Abweichungen von der planerischen Konzeption des Sollzustandes eines Gebäudes oder einer technischen Anlage. Hier sind aber nur jene Mängel eines Bauwerkes zu verstehen, die unmittelbar oder meist mittelbar zu einem Gefahrenzustand führen.

Als einfachstes Beispiel seien unzulässige Abweichungen von Normen zu verstehen. So kann zum Beispiel die mangelhafte thermische Isolierung einer Feuerstätte (siehe Punkt 4.3.3) zu einer gefährlichen Übertragung von Wärmeenergie auf Brennbares führen. Auch das Zerstören von Hinterlüftungen ist als brandkritische Maßnahme zu verstehen. Das Einlegen von elektrischen Mantelleitungen ohne Schutzrohr in Beton hat eine unzulässige Beanspruchung der Isolierung oder gar der Leitungsadern zur Folge. Andererseits kann eine unsachgemäß unter mechanischer Spannung verlegte Gasleitung für einen Rohrbruch oder eine Leckage prädestiniert sein, so dass sich eine explosive Atmosphäre entwickeln kann. Auch unbeachtete Korrosionsschäden sind gravierende Mängel.

Beim Brandschutz sind die vielfältigen normativen Vorgaben zu berücksichtigen, auch wenn sie nicht unmittelbar mit einer Brandursache in Zusammenhang stehen. Die Verstöße gegen diese Sicherheitsvorschriften oder Regeln haben verheerende Wirkungen und sind bei der Ursachenermittlung häufig von Bedeutung. Hier sei beispielsweise auf blockierte Rauch- oder FH-Türen verwiesen, die zu einer großflächigen Brandausweitung führen. Auch unsachgemäß ausgeführte Wanddurchdringungen können Brandabschnitte ungewollt vergrößern. Der Einbau von ungeeigneten Baumaterialien hat sich häufig als fatal gezeigt, wenn z. B. leicht entflammbares Material im Hochbau verwendet wird. Hier wird der gesamte vorbeugende Brandschutz tangiert. Auf die umfangreiche Fachliteratur muss verwiesen werden.

Die Möglichkeiten eines Baumangels sind sehr groß, so dass die hier genannten Beispiele nur die Aufmerksamkeit auf die umfangreichen, gelegentlich sehr komplizierten Normen und Baubestimmungen richten sollen, die die ganze Sorgfalt des Fachmanns erfordern. Die meisten Brandursachen lassen sich auf Errichtungs-, Wartungs- und Bedienungsängeln zurückführen.

Im Rahmen der Sparmaßnahmen werden bauliche Anlagen auch von Laien durchgeführt, ohne sich um technische Bestimmungen und Anforderungen zu kümmern. Die Baumärkte stellen alle denkbaren Materialien zur Verfügung, so dass eine brand- und explosions sichere Durchführung von Gewerken nicht mehr gesichert ist. Das gilt insbesondere für den Fall, dass aus Gründen der Betriebssicherheit zwar ausführliche Anleitungen mitgeliefert, aber diese Sicherheitshinweise nicht beachtet werden oder sprachlich unverständlich abgefasst sind.

Zu den Bauten gehören auch Dämme. Bei ungenügender Auslegung oder bei fahrlässiger oder vorsätzlicher Schwächung ist mit Dammbrüchen zu rechnen, welche zu unmittelbaren mechanischen Schäden führen oder sekundäre Schäden verursachen können, die eine Erhöhung der Brandgefahr bewirken.

4.7 Explosion

4.7.1 Einführung

Neben dem Brand stellt die Explosion eines der größten Risiken dar, das Personen und Sachen durch Freisetzung physikalischer oder chemischer Energie bedroht. Explosionen ereignen sich zwar seltener als Brände, aber in ihrer Folge treten wegen der hohen Geschwindigkeit der Energiefreisetzung oft erheblich höhere Schäden ein.

Explosionen können Brände in unterschiedlicher Weise auslösen, sind also eine der zahlreichen potentiellen Zündquellen eines Brandes. Explosionen können aber auch im Verlaufe eines Brandes erfolgen, und es können gerade erst hierdurch wesentlich größere Schäden als durch das Primäreignis Brand eintreten. Explosionen sind durch eine Vielzahl von physikalischen und chemischen Faktoren gesteuert. Daher ist die Untersuchung solcher Ereignisstätten im Allgemeinen nur unter Mitwirkung von Sachverständigen möglich.

4.7.2 Begriffe und Definitionen

Da der Begriff „Explosion“ im allgemeinen Sprachgebrauch für unterschiedliche Erscheinungen verwendet wird, ist eine klare Definition dieses und weiterer Begriffe aus diesem Fachbereich von Bedeutung. Explosion findet Verwendung für die Explosion im weitesten Sinne, also zur Bezeichnung aller physikalischen und chemischen Typen, ferner nur für die „chemische Explosion“ in Abgrenzung von der oft als „Zerknall“ benannten „physikalischen Explosion“ oder aber lediglich für den einzelnen Typ der „Raumexplosion“ gegenüber der oft fälschlicherweise als „Detonation“ bezeichneten „Sprengstoffexplosion“; denn solche Explosionen können auch mit geringerer als der Detonationsgeschwindigkeit verlaufen. Zur weiteren Begriffsverwirrung trägt bei, dass solche Ereignisse, die mit mäßig lautem Knall und leichteren Beschädigungen verbunden sind, im allgemeinen als Explosionen bezeichnet werden, dagegen solche, die besonders laut erscheinen und größere Zerstörungen bewirken, als Detonationen. Diese subjektiven Zuordnungen stimmen aber selten mit den Ereignisabläufen im physikalischen Sinne überein.

Explosion ist ein Sammelbegriff für schnell ablaufende Vorgänge, bei denen die Energie, die zuvor in einer von vielen möglichen Formen gespeichert war, plötzlich freigesetzt wird, so dass daraufhin im allgemeinen starke Zerstörungen auftreten. Eine Norm liefert folgende umfassende und dabei knappe Definition der Explosion [1]:

„Explosion ist eine schnell ablaufende Umwandlung von potentieller Energie in Ausdehnungs- oder Verdichtungsarbeit oder in beide Arbeiten unter Auftreten von Stoßwellen.“

Die zur Umsetzung gelangte Energie kann zuvor in chemischen Stoffen gespeichert vorgelegen haben oder aber in physikalischer Form, zum Beispiel quasi-statisch als komprimiertes Gas in einem Behälter oder dynamisch als Strömung eines blasenhaltigen Mediums. Es kommen weiterhin Mischformen vor, auf die auch noch eingegangen wird. Außerdem kann der Übergang von einem Brand zu einer Explosion fließend sein. So

kann sich ein Abbrand mit Flamme so weit beschleunigen, dass eine Druckwelle auftritt und somit von einer Explosion zu sprechen ist.

Bei der Mehrzahl der Explosionen finden spezifische chemische und physikalische Effekte statt, die miteinander gekoppelt sind. Insofern treten neben den Wirkungen, wie sie bei Bränden durch chemische Umsetzungen erfolgen, auch vielfältige physikalische Effekte auf. Die chemische Umsetzung wird von Wärme- und Lichtfreisetzung begleitet. Als physikalische Effekte treten auf: die Bildung eines Kraters, das Zerreißen von Behältern, das Wegschleudern von Bruchstücken und die Erzeugung einer Luftdruckwelle, vereinzelt auch einer Druckwelle im Erdboden.

4.7.3 Explosionstypen

Wegen der Vielfalt der Mechanismen von Explosionen ist eine Einteilung in Physikalische Explosionen einerseits und in Chemische Explosionen andererseits erforderlich. Die letztgenannte Gruppe ist groß, und sie lässt sich in mehrere Typen und Subtypen unterteilen. Von diesen sollen hier die Sprengstoffexplosion und die Raumexplosion genannt und näher erläutert werden. Explosionen mit Unterschallgeschwindigkeit werden als Deflagrationen, solche mit Überschallgeschwindigkeit als Detonationen bezeichnet. Daneben gibt es andere Einteilungskriterien, die zu den Begriffen Verpuffung und Explosion führen.

Im Folgenden wird auch auf seltener auftretende Typen wie die Wärmeexplosion oder die Blasenresonanzexplosion eingegangen, und es werden Phänomene wie die Dampfwolken-Explosion und BLEVE kurz beschrieben.

4.7.3.1 Physikalische Explosion

Behälter-Zerknall

Überschreitet der Innendruck den Berstdruck des Behälters, so versagt dieser durch Aufreißen oder Absprengen von Teilstücken. Dies tritt insbesondere bei der unkontrollierten Erhitzung von geschlossenen Behältern auf. Hierbei wird der Inhalt durch Abblasen aus einem Riss oder durch Abströmen aus einer größeren Öffnung unter Geräuschentwicklung freigesetzt. Eine Gefährdung droht hauptsächlich durch das Fortschleudern eines oder mehrerer Bruchstücke.

Der Behälterzerknall tritt insbesondere bei mechanisch oder korrosiv beschädigten Behältern auf. Ein vorhandenes Überdruckventil kann den Zerknall nicht in jedem Fall verhindern. Werden geschlossene flüssigkeitsgefüllte Behälter über die Siedetemperatur der Flüssigkeit erwärmt, treten immer gefährliche Überdrücke auf, die beim Erreichen des Berstdrucks zum Versagen des Behälters führen. Auch können Wasserreste, die in geschlossenen Behältern oder Rohren verblieben sind, beim Schweißen zu kritischen Überdrücken führen.

Der Zerknall wird im strafrechtlichen Sinne auch als „Herbeiführen einer Explosion“ bewertet.

Blasenresonanzexplosion

Mehrere deutsche Physiker befassten sich mit Störfällen, wie dem Siedeverzug bei Dampfkesseln, dem Wasserschlag in Leitungsnetzen für Flüssigkeiten oder den Dampfexplosionen, die beim Kontakt zwischen heißen Schmelzen und Wasser auftreten können, und Leiber fasste diese mit dem Begriff „Blasenresonanzexplosion“ zusammen. Sie kann immer dann auftreten, wenn in Flüssigkeiten Blasen oder in festen Stoffen Poren entstehen oder vorhanden sind. Mehrere Veröffentlichungen, die das weite Spektrum von kleinräumigen Unfällen in der Küche bis zu großen Ereignissen in Tanklagern für Flüssiggase und Öle anhand von Beispielen beschreiben und den Explosionsmechanismus erklären, machten dieses besondere physikalische Phänomen zunächst im deutschsprachigen Bereich bekannt [2], [3], [4] und [5]. Eine umfangreiche Monographie dieses Autors zu diesen Phänomenen mit dem Schwergewicht auf der theoretisch-physikalischen Deutung sowie auf sicherheitswissenschaftlichen Gesichtspunkten trägt den Titel „Assessment of Safety and Risk with a Microscopic Model of Detonation“.

In einem flüssigen Medium ist dieses Explosionsphänomen durch das Vorhandensein von kleinen Bläschen zu erklären, also durch die Zweiphasigkeit eines solchen Systems. Wenn die zuvor unter Aufwendung von Energie entstandenen Blasen kollabieren, werden innerhalb sehr geringer Zeit hohe Energiemengen freigesetzt. Liegen beispielsweise Bläschen von 1 μm Größe bei 1 bar vor, so wird bei deren Kollaps eine volumenspezifische Leistung von ungefähr 1 MW cm^{-3} frei. Liegen in einem Medium sehr viele annähernd gleich große Bläschen vor und kollabieren diese gleichzeitig infolge einer äußeren Einwirkung, so entstehen in der Flüssigkeit wegen deren geringer Kompressibilität sehr hohe Drücke. Diese können etwa 1,5 GPa (1.500 MPa = 15 kbar) erreichen; sie besitzen damit eine Größe, wie sie bei der Langsamen Detonation von Explosivstoffen auftreten können. Derartige Explosionen erfolgen umso heftiger, je kleiner die Blasen sind und je mehr Blasen synchron kollabieren.

Dieser Explosionstyp tritt auch beim Bersten von Behältern mit druckverflüssigten unbrennbaren Stoffen wie Kohlensäure zutage. Handelt es sich aber bei dem Inhalt um brennbare Flüssiggase, so führt das physikalische Explosionsgeschehen zur atmosphärischen Verteilung des Behälterinhaltes, und es wird oft weitgehend von dem schnellen explosionsartigen Abbrand des Stoffes nach dessen Zündung überdeckt (siehe BLEVE im Abschnitt 4.7.3.3).

Viele Fälle solcher physikalischer Explosionen haben sich in Hüttenwerken und Gießereien beim Kontakt von Wasseranhaftungen mit Metall- oder Schlackenschmelzen zugezogen. Lange bekannt sind auch Explosionen, die sich nicht selten ereignen, sobald Wasser in heiße Öle geraten ist. Die Problematik ergibt sich infolge der besonderen Verhältnisse der Siedepunkte und der Dichten. Da das schwerere Medium den niedrigeren Siedepunkt besitzt, liegt dieses in dem leichteren Medium nach dessen Erhitzung als instabile Phase am Boden, von diesem Medium umhüllt, vor. Nachdem es überhitzt ist, kann es explosionsartig zerfallen, feinste Bläschen im Öl bilden und dann hohe Überdrücke auftreten lassen. Solche Explosionen werden „Entrapment-Explosionen“ (von englisch *entrapment* = *Einschluss*) genannt (siehe Abb. 27).

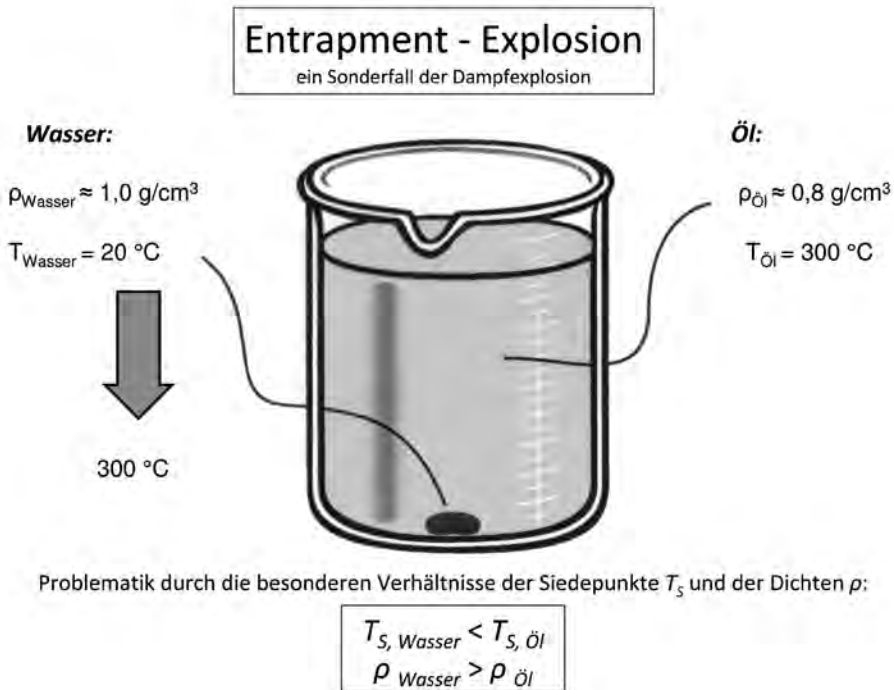


Abb. 27: kritische Bedingungen für das Zwei-Phasen-System Wasser/Öl

Aber auch bei einer Situation, dass heißes, schmelzflüssiges Metall plötzlich in ein kaltes flüssiges Medium hineingerät, kann eine solche äußerst heftige Explosion erfolgen. Vorkommnisse dieser Art werden Fragmentierungen genannt, und sie sind vereinzelt in der Metallverhüttung aufgetreten, sie können sich aber auch in nuklearen Reaktoren ereignen, wenn bei unkontrolliertem Erhitzen von Brennstäben in einem Atomreaktor eine „Kernschmelze“ eintritt.

4.7.3.2 Chemische Explosion

Zunächst sei auf einige Erkenntnisse der Wärmelehre, der *Thermodynamik*, eingegangen, die als *Legislative* die Voraussetzungen für den Verlauf von chemischen Reaktionen vorgibt – im Gegensatz zur *Reaktionskinetik*, die, auch als *Exekutive* bezeichnet, den Verlauf solcher Vorgänge beschreibt.

Vor einer Chemischen Explosion ist Energie in den Ausgangssubstanzen gespeichert (innere Energie), die durch die Umsetzung freigesetzt wird. Hierbei wird außer den Reaktionsprodukten sowohl mechanische als auch Wärmeenergie erzeugt. Die gebildeten Stoffe sind in fast allen Fällen solcher Explosionen Dämpfe oder Gase. Erfolgt die Umsetzung in einem geschlossenen Raum, so wird die Energie als Wärmemenge vorliegen, die den gebildeten gasförmigen Stoffen und den Wandungen vermittelt wird, so dass

deren Temperatur ansteigt. Auf diese Weise tritt ein Überdruck auf, und die Wärmemenge fließt über die Wände ab, sofern diese nicht zerstört werden.

Allgemein gilt: bei Zufuhr von Wärme Q zu einem System, z. B. durch eine chemische Reaktion in einem explosionsfähigen Gemisch der Masse m , wird deren innere Energie U durch Zunahme der Temperatur T erhöht:

$$dU = C \cdot m \cdot dT$$

Hierin ist C die spezifische Wärme des Stoffsystems.

Wenn zusätzlich mechanische Arbeit A an dem System geleistet wird, ändert sich die innere Energie auch durch diese Energiezufuhr; daher gilt:

$$dU = dQ + dA$$

Dies ist der „Erste Hauptsatz der Thermodynamik“, es ist der Erhaltungssatz der Energie.

Nimmt man nun an, dass bei der Wärmezufuhr auch Arbeit vom System nach außen abgegeben wird, beispielsweise durch Verschiebung eines Kolbens oder einer Wand, wie es typischerweise bei einer Explosion geschieht, so ist diese Arbeit durch Volumenvergrößerung dV bei momentan gleichem Druck p mit negativem Vorzeichen zu setzen:

$$dA = -p \cdot dV$$

somit gilt:

$$dU = dQ - p \cdot dV$$

Die mechanische Energie, die eine Explosion außer thermischer Energie freizusetzen vermag, kann sich verteilen auf: die Verformung des Behälters, die Druckwelle und die kinetische Energie der Bruchstücke.

Erwähnt sei noch, dass nach dem „Zweiten Hauptsatz der Thermodynamik“ eine weitere Größe in die Betrachtung einbezogen werden muss, die *Entropie*. Die Änderung dieser Größe ist neben der Fähigkeit einer Reaktion, Wärme bei konstantem Volumen oder bei konstantem Druck zu liefern, ein weiteres Maß dafür, ob eine Reaktion ablaufen kann. Sie kann als Grad der Unordnung gesehen werden. Die Entropie kann im abgeschlossenen System bei irreversibler Veränderung nur zunehmen.

Nach diesem Gesetz können immer dann Reaktionen ablaufen, wenn sie die „maximale Nutzarbeit“, auch „freie Enthalpie“ genannt, liefern können. Dies ist der Fall, wenn die Reaktion „exotherm“, d. h. Wärme nach außen abliefernd, ist. Bei explosionsfähigen Systemen liegt immer „Exothermie“ vor, und außerdem tritt eine Entropie-Zunahme auf. Daher vermögen sie alle nach der Auslösung der Zündung spontan abzulaufen.

Bezogen auf Explosionen, die in der Gasphase als Umsetzungen von fein verteilten brennbaren Stoffen – fast immer – in Mischung mit Oxidationsmitteln ablaufen, auch *Raumexplosionen* genannt, sind die Vorgänge der *Zündung*, der *Umsetzung* und der

Ausbreitung der Verbrennungserscheinung von Bedeutung, und sie sollen hier kurz erläutert werden.

Zur *Zündung* geeignet sind alle Quellen, die eine ausreichende Wärmemenge liefern und diese auf das explosionsfähige Gas (z. B. reines Acetylen) oder Gasgemisch übertragen können, also *Funken, heiße Oberflächen, Flammen, Licht, Katalysatoren*. Die *Zündung* kann zu zwei verschiedenen Mechanismen führen: der *Wärmeexplosion* oder der *Kettenexplosion*.

Nach der Theorie der *Wärmeexplosion* von *van't Hoff* und *Arrhenius* steigt die Geschwindigkeit chemischer Reaktionen mit der Konzentration c der Ausgangsstoffe, beispielsweise der beiden Stoffe X und Y , ferner mit der Erhöhung der Temperatur T . Diese Abhängigkeit folgt einer e -Funktion. Es gilt in grober Näherung, dass chemische Reaktionen bei Erhöhung der Temperatur des Systems um 10 K doppelt (bis viermal) so schnell ablaufen („Reaktionsgeschwindigkeits-Temperatur-Regel, RGT-Regel“).

Gemessen wird diese Geschwindigkeit im Allgemeinen als Zunahme der Konzentration c_Z des Endproduktes Z mit der Zeit t .

$$\frac{dc_Z}{dt} = k \cdot c_X \cdot c_Y \cdot e^{-\frac{E_A}{R \cdot T}}$$

k ist hierbei die für die Reaktion typische Geschwindigkeitskonstante, E_A die Aktivierungsenergie und R die Gaskonstante. Die nach der Zündung beginnende Umsetzung erzeugt Wärme und diese würde bei sehr langsamer Reaktion aus dem betrachteten Volumen abfließen. In schnell reagierenden Systemen ist dieser Wärmetransport aber erheblich eingeschränkt; es herrschen Umstände, die „adiabatischen“ nahekommen, also solchen, bei denen jeder Wärmeübergang zu der Umgebung ausgeschlossen ist. Die Reaktion führt somit zu einem Temperaturanstieg in diesem Volumen. Unter realen Bedingungen bewirkt die Temperaturdifferenz gegenüber der Umgebung einerseits einen Wärmefluss aus dem Volumen nach außen, der *linear* mit dieser Differenz steigt. Gleichzeitig wird aber mit der Temperaturerhöhung die Reaktionsgeschwindigkeit steigen, und zwar *exponentiell*.

Das folgende Diagramm lässt erkennen, dass oberhalb einer Grenztemperatur T_{w3} für die Behälterwand in einem solchen System, beispielsweise bei der Temperatur T_{w2} , entsprechend Kurve 2, mehr Wärme q_R pro Zeiteinheit durch die Reaktion erzeugt wird, als Wärme q_W über die Wand abfließen kann. Daher wird sich die Reaktion zur *Wärmeexplosion* beschleunigen.

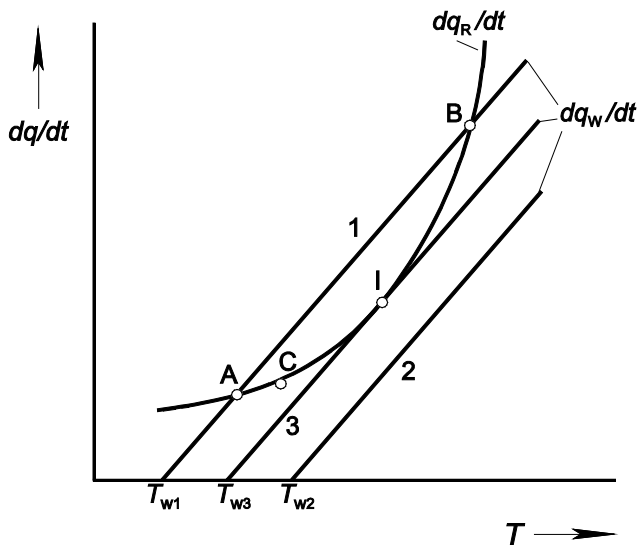
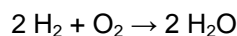


Abb. 28: Wärmefreisetzungsgeschwindigkeit dq_R/dt und Wärmestrom zur Wand dq_W/dt (nach Bothe in: Steen [5])

Der zweite bedeutende Mechanismus einer Chemischen Explosion ist derjenige der *Kettenexplosion*. Während bei jener das Verhältnis von Wärmefreisetzungsgeschwindigkeit und Wärmetransportgeschwindigkeit entscheidet, ob eine explosionsartige Reaktion erfolgen kann und welche Entwicklung sie nimmt, ist diese durch die Konkurrenz zwischen der Bildung und der Vernichtung von aktiven Teilchen, wie sie intermediär als *Atome* und *Radikale* bei vielen Reaktionen in Gasphasen auftreten, bestimmt. Diese Abläufe sind besonders gut an dem „Knallgas-System“



untersucht, ebenso an Gemischen von Alkanen mit Luft. Es können bei solchen Gemischen Detonationsgeschwindigkeiten von mehreren tausend Metern pro Sekunde auftreten. Diese Geschwindigkeiten liegen typischerweise oberhalb der Schallgeschwindigkeit.

Das Geschehen in solchen Explosionsflammen als Wechselspiel von *Erzeugung* und *Verzweigung* von aktiven Teilchen einerseits und der *Vernichtung* solcher Teilchen andererseits ist an diesem Beispiel genau untersucht worden. Ein Maß für die Beschleunigung des Reaktionsgeschehens bei diesen „chemischen Kettenreaktionen“ ist der *Verzweigungsfaktor*. Dieser ist in einer groben Analogie vergleichbar mit dem *Multiplikationsfaktor* bei der neutroneninduzierten Kernspaltung von Uran und Plutonium, welcher die Möglichkeit der Auslösung einer „thermonuklearen Explosion“, die nicht Teil dieser Abhandlung ist, erklärt.

Sprengstoffexplosion

Sprengstoffexplosionen erfolgen, wenn Sprengstoffe, korrekt als *Explosivstoffe* bezeichnet, durch eine Zündquelle zur chemischen Umsetzung gelangen.

Von den Eigenschaften der Explosivstoffe und ihrer Verdämmung hängt es ab, ob sie sich mit einer Reaktionsgeschwindigkeit von einigen hundert Metern pro Sekunde (Deflagration), oder aber mit sehr hoher Geschwindigkeit von bis zu etwa 10 km s^{-1} (Detonation) umsetzen.

Bei den detonativ reagierenden Explosivstoffen tritt die Wirkung durch die Stoßwelle ein, die beispielsweise Baustoffe zermalmen oder zertrümmern, zumindest aber erheblich deformieren kann (siehe Punkt 4.7.4).

Explosionsfähige Stoffe und Gemenge

Sprengstoffe werden einerseits als Gemenge von Oxidationsmitteln und „verbrennlichen Substanzen“ (technischer Begriff) gefertigt, wie sie hauptsächlich als „pyrotechnisches Material“ in „pyrotechnischen Gegenständen“ Verwendung finden, zum Beispiel Gemenge von Nitraten, Chloraten oder Perchloraten mit Schwefel, Kohle, Zucker oder/und Stärke, jeweils in Pulverform. Andererseits sind bestimmte chemische Verbindungen in der Lage, explosionsartig zu reagieren. Zu diesen Substanzen rechnen Initialsprengstoffe (Primärsprengstoffe) in Zündern von Munition und Bomben, hauptsächlich aber die zahlreichen für gewerbliche und militärische Zwecke hergestellten Explosivstoffe (Sekundärsprengstoffe), beispielsweise Ammongelit, Nitroglycerin, Trinitrotoluol (TNT), Hexogen, Nitropenta.

Für weitere Informationen wird beispielsweise auf die Monographie „Explosivstoffe“ von Köhler et al. verwiesen.

Zündung

Eine zuverlässige detonative Umsetzung von Explosivstoffen kann durch Zünder, welche ‚Initialsprengstoffe‘ enthalten, eingeleitet werden. Aber auch Schlag, Reibung und thermische Belastungen vermögen Zersetzungen auszulösen, welche dann bis zur Detonation gehen können.

Für eine Bewertung dieser Zündquellen sind Testverfahren von Materialforschungsinstituten wie in Deutschland der „Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)“ in Berlin erarbeitet worden, insbesondere durch den „Fallhammerapparat“, den „Reibapparat“ und das „Stahlhülsenverfahren“. Durch diese Methoden wird festgestellt, ob ein Stoff gemäß § 1 des Sprengstoffgesetzes [6] als ein „explosionsgefährlicher Stoff“ zu bezeichnen ist.

Schutzmaßnahmen

Ziel ist zunächst, dass die Einwirkung sämtlicher Zündquellen bis hin zu elektrostatischen Entladungen vermieden wird.

Da die Wirkung von Explosionen stark mit vergrößertem Abstand abnimmt, besteht eine weitere Möglichkeit des Schutzes in einer entsprechenden Maßnahme. Ist dies nicht praktikabel, so lässt sich ein Schutz durch bautechnische Vorkehrungen beispielsweise

für sprengstoffverarbeitende Betriebe oder für Sprengstoffläger in der Weise schaffen, dass die Wände der Gebäude zu den zu schützenden Richtungen hin gegen einen Explosionsdruckstoß hinreichend fest gestaltet werden und eine Wand oder das Dach leicht gefertigt wird. Hierdurch kann erreicht werden, dass eine Entlastung des Druckes über diese schwach ausgelegten Flächen erfolgen kann und die übrigen Flächen eine geringere Beaufschlagung erfahren. Außerdem können Umwallungen einen zusätzlichen Schutz gegen die bodennahe Ausbreitung von Druckwellen, aber auch von Sprengstücken bieten.

Raumexplosion

Der Begriff *Raumexplosion* ist ein im deutschsprachigen Bereich geprägter Begriff für die explosionsartige chemische Umsetzung von fein verteilten, mit Luft oder Sauerstoff vermischten brennbaren Stoffen, wobei im allgemeinen der Raum oder der Behälter, in dem sich das Gemisch befand, beschädigt oder zerstört wird. Subtypen dieses Explosionstyps sind die Explosionen von

- reinen Gasen
- Gas/Luft-Gemischen,
- Dampf/Luft-Gemischen,
- Gemischen von Nebeln in Luft und
- Gemischen von aufgewirbelten Stäuben in Luft, außerdem von
- Staub/Gas/Luft-Gemischen („hybriden Systemen“).

Auch reine Gase wie Acetylen und Ethylenoxid können zu Raumexplosionen führen.

Eine Raumexplosion ist nicht zwingend auf das Vorhandensein eines geschlossenen Volumens angewiesen. Allerdings sind die Wirkungen solcher Explosionen innerhalb geschlossener Räume im Allgemeinen am stärksten. In den meisten Fällen ist es nur ein Teilvolumen innerhalb eines Raumes, in dem die Explosion stattfindet. Befindet sich innerhalb eines geschlossenen Raumes ein Volumen von mehr als 10 Litern so ist bei der Explosion mit schädigenden Wirkungen zu rechnen („gefährdeter Bereich“).

Im Folgenden sei kurz auf die Zusammensetzung solcher disperser Phasen eingegangen:

- Gas/Luft-Gemische bilden sich durch Vermischung von brennbarem mit oxidierendem Gas als „molekulardisperse Phase“, stellen also eine Gasphase dar,
- Dampf/Luft-Gemische liegen nach ihrer Bildung auch als Gasphase vor, allerdings ist die brennbare Komponente der Dampf einer Flüssigkeit,
- Nebel/Luft-Gemische entstehen durch Vernebelung einer brennbaren Flüssigkeit zu kleinen Tröpfchen (Aerosolen),
- Staub/Luft-Gemische bilden sich aus, wenn brennbarer Stoff in feinsten Verteilung als Feststoff mit Luft verwirbelt wird und

- hybride Gemische enthalten neben dem Gas im Gemisch mit Luft noch Staub als weiteren brennbaren Anteil, beispielsweise Methan/Luft-Gemische, in denen Kohlenstaub aufgewirbelt wurde.

Gerade anhand der Staub/Luft-Gemische lässt sich erkennen, wie sehr die Korngrößenverteilung brennbarer Feststoffe deren Abbrandgeschwindigkeit beeinflusst. So brennt Cellulose in fein verteilter Form, beispielsweise in Form von Watte, erheblich schneller ab als massives Holz. Eine weitere Steigerung der Verbrennungsgeschwindigkeit ergibt sich bei feinsten Verteilung von Cellulose-Staub in Luft: die Reaktion läuft nach der Entzündung explosionsartig ab: es findet kein Brand statt, sondern eine *Staubexplosion*. Die Reaktionsgeschwindigkeit bestimmt also, ob noch ein Brand oder schon eine Explosion erfolgt. Dementsprechend sind die Übergänge zwischen Bränden von fein verteilten brennbaren Feststoffen und Explosionen von derartigen mit Luft vermengten Stäuben fließend. Teilchengrößen zwischen 1 µm und 100 µm gelten als besonders kritisch in dieser Hinsicht. Als Obergrenze wird eine solche von 500 µm angesehen (siehe „Gefahrstoffinformationssystem der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung“). Die untere Explosionsgrenze eines Staub/Luft-Gemisches liegt in den meisten Fällen oberhalb von 20 g m⁻³ [7].

Bildung und Ausbreitung explosionsfähiger Systeme

Die Bildung von Gas/Luft-Gemischen erfolgt durch Einströmen einer gasförmigen Komponente in die andere oder durch deren gemeinsames Zusammenströmen. Die Geschwindigkeit der Entstehung eines Gemisches ist von den Strömungsgeschwindigkeiten und von dem dabei vorliegenden Grad der Turbulenz abhängig.

Solche Vermischungsvorgänge seien am Beispiel der brennbaren Gase und der Dämpfe brennbarer Flüssigkeiten näher erläutert, und zwar können sie

- durch Diffusion bei laminarer Strömung unter dem Einfluss der Molekularbewegung und der Gravitation,
- durch thermische Konvektion oder aber
- durch turbulente Einströmung in einem Freistrah

erfolgen.

Hierbei sind insbesondere folgende Parameter von Bedeutung:

- die Dichtezahl des Gases oder Dampfes, also das Verhältnis deren Dichte zu derjenigen der Luft,
- der Wärmeeintrag in das System und
- der Charakter der Strömung, durch die „Reynolds-Zahl“ beschrieben.

Diese Vermischungsvorgänge bei Dampf/Luft-Gemischen sind im Abschnitt 1.4.2.5 erläutert.

Zwei Diagramme in einer Veröffentlichung von G. Schön veranschaulichen diese Vorgänge auch sehr gut [8]. Ein vereinfachtes Diagramm ist in einem Tabellenwerk enthalten [9]. Eine ähnliche Darstellung ist Abb. 22 im Abschnitt 1.4.2. Auf die beiden Explosionspunkte sowie den außerdem angegebenen Flammpunkt ist hier ebenfalls eingegangen.

In einer Gemisch-Wolke, wie sie ohne Störeinflüsse in Behältern, die teilweise mit einer brennbaren Flüssigkeit gefüllt sind, entsteht, bilden sich also drei Bereiche, die durch Verdunstung aus einer ausgeflossenen oder verschütteten brennbaren Flüssigkeit allmählich im Verlaufe der Zeit durch Diffusion in die Höhe wachsen, und zwar mit nach oben abnehmender Konzentration an Dampf. Diese drei Bereiche verbreitern sich also mit ablaufender Zeit. Es sind:

- der untere, in dem der obere Explosionspunkt überschritten ist – dieses Gemisch kann nur abbrennen, aber nicht explodieren -,
- der mittlere, in dem eine Explosion ausgelöst werden kann, und
- der obere, in dem der untere Explosionspunkt noch nicht erreicht ist, so dass dort auch keine Explosion, aber auch kein Abbrand erfolgen kann.

Auf diese Begriffe sowie auf die folgend genannten: *untere und obere Zündgrenze, Explosionsgrenzen, Mindestzündtemperatur und Mindestzündenergie* ist auch im Abschnitt 1.4.2. eingegangen.

Erwähnt sei, dass Explosionen von Dampf/Luft-Gemischen im Allgemeinen als *Deflagrationen* verlaufen, allerdings können unter besonderen Umständen auch *Detonationen* stattfinden.

In dem erwähnten Kapitel ist auch der *Flammpunkt* erläutert. Diese Kennzahl lässt also die Einschätzung zu, ob eine Flüssigkeit bei einer bestimmten Temperatur „in Brand geraten“ kann; allerdings lassen sich auch Flüssigkeiten mit einer momentanen Temperatur *unterhalb* des Flammpunktes entzünden, wenn sie nicht in reinem Zustand vorliegen, sondern in dochtartigen Materialien, z. B. Textilien, aufgesogen sind und an deren Oberfläche eine Flamme zur Einwirkung gebracht wird (Beispiel: Petroleumleuchte).

Der Flammpunkt ist für viele Beurteilungen als eine sicherheitsrelevante Größe anzusehen. Er liegt im Allgemeinen mehrere Grad oberhalb des unteren Explosionspunktes. Somit können sich durchaus beim Einwirken einer qualifizierten Zündquelle Explosionen im Dampfraum oberhalb des Spiegels einer brennbaren Flüssigkeit ereignen, wenn deren Temperatur wenig *oberhalb* des unteren Explosionspunktes, dabei aber *unterhalb* des Flammpunktes liegt. Dieses Risiko besteht besonders bei Flüssigkeiten mit hohem Flammpunkt, die niedrigsiedende Stoffe enthalten, beispielsweise schweren Heizölen, bei Lagerung in geheizten, geschlossenen Behältern. Auf diese Problematik ist der erwähnte Autor Schön auch eingegangen [8].

Bedeutsam für die Verhütung von Explosionen sind auch die in den §§ 11 und 12 der *Gefahrstoffverordnung* genannten Maßnahmen.

Brennbare Gase können genauso wenig wie Flüssigkeiten selbst brennen, sondern nur deren Gemische mit Luft oder Sauerstoff, soweit die Brennstoffkonzentration innerhalb der jeweiligen *Zündgrenzen* liegt. Wird ein brennbares Gas, das aus einer Öffnung zum Ausströmen in Luft gebracht wird, unverzüglich gezündet, so brennt es mit einer Flamme ab. Strömt dagegen ein brennbares Gas eine geraume Zeit in Luft ein und vermischt sich mit dieser weitgehend gleichmäßig, so erfolgt bei der Einwirkung einer entsprechend qualifizierten *Zündquelle* eine Explosion, deren Stärke von der Zusammensetzung und von der Menge des explosionsfähigen Gemisches sowie von den Randbedingungen der Umsetzung abhängt. Auch hier erfolgt im Allgemeinen eine *Deflagration*, in Einzelfällen aber auch eine *Detonation*.

Wird also ein fein verteilter brennbarer Stoff bei seiner Freisetzung mit Luft gemischt und gezündet, so erfolgt ein Abbrand, wie es von Brennern für Heiz- oder Schweißzwecke bekannt ist. Erfolgt dagegen die Zündung erst eine geraume Zeit nach der Ausbildung einer solchen Mischung, so tritt eine Explosion ein; man spricht von einer „vorgemischten Phase“.

Zündung

Typische Zündquellen für explosionsfähige Atmosphären sind gemäß der Norm „Explosionsfähige Atmosphären – Explosionsschutz – Teil 1: Grundlagen und Methodik“, DIN EN 1127-1:

1. heiße Oberflächen,
2. Flammen und heiße Gase,
3. mechanisch erzeugte Funken,
4. elektrische Anlagen,
5. elektrische Ausgleichsströme, kathodischer Korrosionsschutz,
6. statische Elektrizität,
7. Blitzschlag,
8. elektromagnetische Wellen von 3×10^4 Hz bis 3×10^{11} Hz,
9. elektromagnetische Wellen von 3×10^{11} Hz bis 3×10^{15} Hz,
10. ionisierende Strahlung,
11. Ultraschall,
12. adiabatische Kompression und Stoßwellen, ferner
13. exotherme Reaktionen, einschließlich Selbstentzündung von Stäuben.

Von diesen Zündquellen für explosionsfähige Atmosphären sind die mit 1. bis 9. sowie mit 12. und 13. aufgelisteten auch bei Bränden zu berücksichtigen, und sie sind in dem Kapitel 4 bereits ausführlich beschrieben. die unter 10. und 11. genannten können im Allgemeinen nur bei Explosionen auslösend sein.

Die genannte Norm liefert ausführliche Erläuterungen sowohl zu diesen einzelnen Zündquellen als auch zu den Möglichkeiten des Explosionsschutzes. Außerdem sind in den „Explosionsschutz-Richtlinien“ (EX-RL, BGR 104) der „Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung“ noch wesentlich mehr Hinweise zu den Möglichkeiten der Entstehung und der Zündung explosibler Atmosphären geliefert, insbesondere durch eine umfangreiche Beispielsammlung und Literaturhinweise. Es seien hier zu den einzelnen Zündquellen einige Erläuterungen gegeben, wobei die Einteilung in die dreizehn genannten einzelnen Typen aus DIN EN 1127-1 übernommen wurde.

Zu 1.:

Heiße Oberflächen: Deren Zündfähigkeit nimmt mit zunehmender Temperatur und Oberfläche zu. Weiterhin spielt die Wölbung einer Oberfläche in der Weise eine Rolle, dass explosionsfähige Atmosphären in *konkaven* Körpern wie Kugeln oder Rohren bei *niedrigeren* Wandtemperaturen, als nach der Norm EN 14522 bestimmt, gezündet werden können, dass dagegen bei *konvexen* Körpern eine *höhere* Temperatur nötig ist. Die Verweilzeit der Atmosphäre an der Oberfläche spielt eine Rolle, als bei kurzen Zeiten *höhere* Temperaturen vonnöten sind, bei längerem Verweilen aber auch durch Vorreaktionen in Form von kalten Flammen *geringere* Werte erforderlich sein können. Außerdem kann eine Zündung auch an Körpern erfolgen, die durch Reibungs- und Zerspanungsvorgänge erhitzt werden, so an Bremsen und ungeöhlten Lagern. Ferner können chemische Reaktionen zu erhöhten Temperaturen führen, und es können sich Staubschichten auf einer heißen Oberfläche entzünden und damit zu einer Zündquelle werden (siehe Abschnitte 4.2.1, 4.3.1. und 4.3.4).

Zu 2.:

Flammen und heiße Gase: Flammen selbst, aber auch in ihnen enthaltene glühende Partikeln stellen wirksame Zündquellen dar. Weiterhin sind gemäß der Norm unter 2. auch heiße Partikeln, wie sie beim Schweißen und Schneiden auftreten, einbezogen, und auch diese sind taugliche Zündquellen (siehe Abschnitte 4.2.2 und 4.3.2).

Zu 3.:

Mechanisch erzeugte Funken: Diese entstehen durch Reib-, Schlag- und Abtragvorgänge, wie beim Schleifen. Schlagfunken können auch bei Förderprozessen durch Aufprallen von Metallstücken oder Steinen auf metallene Oberflächen entstehen. Durch Schlagen oder Reiben von Titan oder Zirkonium an harten Oberflächen können auch Funken entstehen, weiterhin durch Thermit-Reaktion, wenn Rost und Leichtmetalle aufeinandertreffen. Schließlich können Funken in abgelagertem brennbarem Staub ein Glimmbrand-Nest entstehen lassen und so auch indirekt zur Zündquelle werden (siehe Abschnitte 4.3.1 und 4.3.2).

Zu 4.:

Elektrische Anlagen: Elektrische Funken und heiße Oberflächen können beim Öffnen und Schließen elektrischer Stromkreise an Schaltern und Relais, aber auch an unvollkommenen Verbindungen („Wackelkontakten“) auftreten (siehe Abschnitt 4.3.6).

Zu 5.:

Elektrische Ausgleichsströme, kathodischer Korrosionsschutz: In elektrischen Leitern können bei Fehlern durch Kurz- oder Erdschluss Ausgleichsströme fließen, ferner können Ströme durch magnetische Induktion und durch Blitzschlag in Leitern entstehen, und es können elektrische Funken beim Trennen oder Verbinden solcher Stromwege auftreten, auch können solche Leiter erhitzt werden. In gleicher Weise können gefähr-

liche Ströme bei Maßnahmen des kathodischen Korrosionsschutzes wirksam werden (siehe Abschnitte 4.3.6, 4.3.6.2 und 4.3.8.1).

Zu 6.:

Statische Elektrizität: An nicht leitfähigen Stoffen wie Materialien aus Kunststoffen können Aufladungen durch Trennvorgänge stattfinden, und diese lassen bei ihrer Entladung zündfähige Funken entstehen (siehe Abschnitt 4.3.5).

Zu 7.:

Blitzschlag: Beim Einschlag eines Blitzes in eine explosionsfähige Atmosphäre erfolgt stets ein Zündung. Außerdem werden in der Nähe von Einschlagstellen starke Ströme in Leitern und Geräten induziert, die ebenfalls hohe Temperaturen und Funken erzeugen können (siehe Abschnitte 4.1.3 und 4.3.6.2.3).

Zu 8.:

Elektromagnetische Wellen von 3×10^4 Hz bis 3×10^{11} Hz: Generatoren für Hochfrequenz wie Funksender oder Geräte zum Erhitzen, Schweißen und Schneiden senden Wellen aus, die in leitfähigen Materialien Ströme induzieren können, wodurch hohe Temperaturen oder Funken bei Berührung bzw. Unterbrechung entsprechender Stromkreise entstehen können. Diese Wirkungen nehmen zu, je näher sich diese sekundären Kreise zu den Sendeanlagen befinden und je besser die Geometrie dieser Kreise an die Frequenz der Sender abgestimmt ist (siehe Abschnitt 4.3.6).

Zu 9.:

Elektromagnetische Wellen von 3×10^{11} Hz bis 3×10^{15} Hz: Strahlen dieses Frequenzbereiches, besonders Licht, vermögen direkt oder über einen primär verursachten Brand explosionsfähige Atmosphären zu zünden. Bei Sonnenlicht besteht diese Gefahr bei Bündelung durch linsen- oder hohlspiegelartige Körper. Das Absorptionsvermögen der getroffenen Oberflächen spielt hierbei eine große Rolle. Laserstrahlung vermag sogar über größere Entfernungen zündend zu wirken (siehe Abschnitt 4.1.1).

Zu 10.:

Ionisierende Strahlung: Solche Strahlung von Röntgenröhren oder von radioaktiven Stoffen vermag bei entsprechender Absorption Zündungen auszulösen. Die genannten Stoffe können sich unter Umständen selbst auf zündkritische Temperaturen erhitzen.

Zu 11.:

Ultraschall: Auch diese Energiequellen können unter bestimmten Bedingungen so viel Energie auf einen Stoff übertragen, dass hierdurch hohe Temperaturen bewirkt werden, die eine Explosion auslösen.

Zu 12.:

Adiabatische Kompression und Stoßwellen: Durch entsprechende Verdichtung kann eine explosionsfähige Atmosphäre gezündet werden. Stoßwellen, die bei der plötzlicher Entspannung von hochkomprimierten Gasen in Rohre mit niedrigeren Drücken hinein auftreten, können auch hohe Temperaturen auftreten lassen. Besonders kritisch ist die entsprechende Situation bei Sauerstoff, da spontane Oxidationen mit entsprechender Wirkung stattfinden können (siehe Abschnitt 4.3.1).

Zu 13.:

Exotherme Reaktionen, einschließlich Selbstentzündung von Stäuben: Es können Alkalimetalle bei Reaktion mit Wasser erhöhte Temperaturen und Flammen entstehen lassen, ebenso pyrophore Stoffe und brennbare Stäube mit Luft, ferner bestimmte Futtermittel. Weiterhin können Katalysatoren Zündungen von Gas/Luft-Gemischen bewirken (siehe Abschnitt 4.2.1).

Im Gegensatz zu den vielen angeführten Zündquellen vermag *glimmender Tabak* allerdings Gemische von brennbaren Gasen oder von Dämpfen brennbarer Flüssigkeiten, beispielsweise Propan oder Otto-Kraftstoff, mit Luft *nicht* zu entzünden. Lediglich die folgenden Stoffe in Mischung mit Luft können durch die Glutzone von Tabakwaren gezündet werden (siehe Punkt 4.3.2): Schwefelkohlenstoff, Wasserstoff, Acetylen, Ethylenoxid, Phosphorwasserstoff und Schwefelwasserstoff. Diethylether („Äther“) und einige andere Stoffe können nur unter bestimmten Bedingungen durch Tabakglut gezündet werden [10].

Auf die für die Auslösung einer Explosion von Dämpfen brennbarer Flüssigkeiten oder von Gasen bedeutenden Parameter, die ‚*sicherheitstechnischen Kenngrößen*‘ (auch als ‚*STK*‘ abgekürzt), ist bereits ausführlich in Punkt 1.4.2.11 eingegangen.

Zu der Art und Weise, wie diese Zündquellen Raumexplosionen auslösen können, seien einige Erläuterungen gegeben. Der Ort der Zündung einer Raumexplosion liegt häufig am Rande einer Gemischwolke dort, wo die untere Zündgrenze gerade überschritten ist. Dies gilt für die Fälle, bei denen ein sich ausbildendes Gemisch zu einer vorher bereits vorhandenen Zündquelle hin ausbreitet. Die Explosion kann aber auch durch eine spontan auftretende Zündquelle (beispielsweise einen Thermostat-Kontakt) mittig innerhalb der Gemischwolke ausgelöst werden.

Bei Explosivstoffen dagegen befindet sich dieser Punkt meistens im Inneren des Stoffes oder des Gemenges. Bei diesen liegt das Zentrum der Explosionswirkung in diesem Bereich, während es im Falle von Raumexplosionen häufig weit vom Punkt der Zündung entfernt dort auftritt, wo das optimal reagierende Gemisch vorhanden ist und entsprechend abreagiert. Ein solches Gemisch besitzt annähernd die stöchiometrische Zusammensetzung. Die Druckanstiegsgeschwindigkeit in solchen Gemischen ist von der Konzentration abhängig; denn die Reaktionsgeschwindigkeit nimmt von dem genannten Bereich zur unteren wie zur oberen Zündgrenze hin jeweils ab.

Schutzmaßnahmen

Wegen der Gefährlichkeit von Raumexplosionen sind viele Maßnahmen zur Vermeidung oder zur Schadensminderung entwickelt worden. Sie finden sich in der entsprechenden Fachliteratur und sind in Regelwerken festgelegt worden. Diese sind neben der erwähnten Norm DIN EN 1127-1 und den „Explosionsschutz-Regeln (EX-RL, BGR 104)“ die „Technischen Regeln für Betriebssicherheit, TRBS 2152, Allgemeines und Teile 1 bis 4, sowie TRBS 2153“.

In der genannten Norm wird als bedeutsame Maßnahme im Abschnitt 4 die Risikobewertung genannt. Diese ist nach EN ISO 12100 und EN 15198 für jede individuelle Situation vorzunehmen. Hierzu sind folgende Maßnahmen zu treffen:

- a) Identifizierung von Explosionsgefahren durch Bestimmen der Wahrscheinlichkeit des Vorhandenseins einer gefährlichen explosionsgefährlichen Atmosphäre,
- b) Identifizierung von Explosionsgefahren durch Bestimmen der Wahrscheinlichkeit des Vorhandenseins von potentiellen Zündquellen,
- c) Abschätzung der möglichen Auswirkungen einer Explosion,
- d) Beurteilen des Zündrisikos und
- e) Berücksichtigen von Maßnahmen zur Verringerung der Risiken.

Das Hauptziel sollte immer sein, dass keine explosionsfähige Atmosphäre entstehen kann oder vorhanden ist. Man spricht auch von „*primärem Explosionsschutz*“. Solche Maßnahmen können sein:

- der Austausch brennbarer durch unbrennbare Stoffe,
- die Begrenzung der Konzentration,
- die Inertisierung (Verdrängen des Luftsauerstoffes durch inerte Gase),
- verfahrenstechnische Maßnahmen,
- Lüftung,
- Überwachung durch Messung.

Ist dies nicht möglich, so ist der Schutz vor Raumexplosionen dadurch zu gewährleisten, dass keine der genannten Zündquellen zur Einwirkung kommen kann. Diese Vorgehensweise wird auch „*sekundärer Explosionsschutz*“ genannt.

Ist auch bei Anwendung dieser beiden Schutzmaßnahmen mit dem Eintreten einer Explosion zu rechnen, so müssen Maßnahmen des *konstruktiven Explosionsschutzes* getroffen werden, durch die die Wirkung einer solchen Explosion auf ein unbedenkliches Maß verringert werden kann. Hierzu zählen die explosionsfeste Bauweise, Maßnahmen zur Explosionsdruck-Entlastung, zur Explosionsunterdrückung und zur explosionstechnischen Entkoppelung.

Die genannte Norm und die Technischen Regeln liefern alle erforderlichen Hinweise zur Verwirklichung solcher Schutzmaßnahmen. Außerdem liefert der „Leitfaden zur Durchführung der Richtlinie 1999/92/EG (ATEX 137)“, der von der Fachstelle für Explosionsschutz der „Deutschen Montan-Technologie GmbH“ in Bochum in Zusammenarbeit mit

„Fraunhofer UMSICHT“ in Oberhausen herausgegeben worden ist, wertvolle Hinweise, ferner die „Gefahrstoffinformationssysteme“ der Gesetzlichen Unfallversicherung und weitere Informationsquellen, die unter 4.7.7, Literatur, angeführt sind. Weiterhin legt die „ATEX-Produkttrichtlinie 94/9/EG“ Regeln fest zum Inverkehrbringen von Produkten wie Geräten und Schutzsystemen, die in explosionsgefährdeten Bereichen eingesetzt werden sollen. Es sind auch nicht-elektrische Geräte mit einbezogen, an denen eine hohe Erwärmung, z. B. durch Reibung, eine Zündgefahr liefern könnte. In dieser Richtlinie sind auch „Gerätegruppen“ und „Temperaturklassen“, ferner „Zonen“ für Gase und Stäube festgelegt worden.

Eine gute Übersicht über Explosionsschutz-Maßnahmen bieten mehrere einschlägige Veröffentlichungen, wie z. B. die der PTB (<http://www.ptb.de/cms/fachabteilungen/abt3/exschutz/ex-grundlagen.html>). Ergänzend ist auf die Abschnitte 1.4.2.4 und 1.4.2.11 zu verweisen, in der einschlägige Normen angegeben sind.

Für die Temperaturklassen sei hier das Beispiel „T6“ mit max. nur 85 °C als niedrigster zulässiger Oberflächentemperatur bei einer dieser Klassen genannt, und diese gilt für den sehr leicht zu entzündenden Schwefelkohlenstoff.

Weiterhin ist ein einprägsames Zeichen („ATEX-Logo“) zu dieser Richtlinie geschaffen worden:



Diesem „Logo“ werden im Einzelfall die Kennzeichnungen für die *Gerätegruppe*, die *Gerätekatgorie*, für *Gas* oder *Staub*, für die *Zündschutzart*, die *Explosionsgruppe* und die *Temperaturklasse* nachgestellt.

Die *Zündschutzarten* sind aus der Überlegung heraus formuliert worden, für viele explosionsgefährliche Situationen in der Praxis jeweils Konzepte zur Vermeidung des Zusammentreffens einer explosionsgefährlichen Atmosphäre mit einer Zündquelle zu entwickeln. Für die zahlreichen technischen Gegebenheiten sind Zündschutzarten für *Gas-* oder *Staubatmosphäre* einerseits und für *elektrische*, aber auch für *nicht-elektrische (mechanische) Betriebsmittel* andererseits, von denen Zündungen ausgehen können, festgelegt worden.

Einige Beispiele der verschiedenen in der Praxis bewährten und in den einzelnen Normen beschriebenen *Zündschutzarten* sind: „druckfeste Kapselung – Ex d“, „erhöhte Sicherheit – Ex e“, „Eigensicherheit – Ex i“, „Vergusskapselung – Ex m“, „Ölkapselung – Ex o“, „Überdruckkapselung – Ex p“, „Sandkapselung – Ex q“.

Weiterhin ist ein Schutz gegen Raumexplosionen durch die Bestimmung von „*flammdurchschlagsicheren Grenzspaltweiten*“ erreicht worden. Hierfür sind unter anderem von der „PTB“ Prüfgeräte entwickelt worden (siehe Abschnitt 1.4.2.11, 1.4.4.2). Die Grenzspaltweite gibt die maximale Weite eines Spaltes in einer „*Flammdurchschlagsiche-*

„*rung*“ an, durch welche eine Zündung nicht übertragen wird. Sie ist vom jeweiligen Stoff abhängig. So gibt es bei der *Gruppe II* die *Untergruppen IIA, IIB und IIC*, wobei von A nach C die Gefährdung steigt.

Bemerkenswert ist, dass die oben erwähnten „BGR 104“ neben den vielen, vorrangig dargelegten *technischen* Explosionsschutzmaßnahmen auch einige *organisatorische* Maßnahmen nennen, wie die Erstellung eines Explosionsschutzdokumentes, die Unterweisung der Beschäftigten, Maßnahmen der Arbeitsfreigabe und die Koordination verschiedener Gewerke. Denn die Erfahrung der Ursachenforschung hat gezeigt, dass sich einige Explosionsfälle mangels ausreichender Arbeitskoordination zugetragen haben.

Die *Betriebssicherheitsverordnung* – siehe Abschnitt 2.7.1.2, 1.4.2.2 – ist für viele überwachungspflichtige Anlagen bedeutsam, und hierzu zählen auch solche, von denen *physikalische* Explosionsgefahren ausgehen wie: *Druckbehälteranlagen, Füllanlagen, Lageranlagen, Rohrleitungen unter Überdruck, Anlagen in explosionsgefährdeten Bereichen*.

Es sind hier unter anderem die *gefährdeten Bereiche*, die *Anforderungen an Arbeitsmittel*, die *Schutzmaßnahmen* genannt, und es sind *Schutzsysteme* und ein *Explosionsschutzdokument* hierin vorgeschrieben worden. Somit umfasst diese Verordnung auch die Gefährdung durch physikalische Explosionen, sie geht also über eine solche lediglich durch chemische Stoffe und ihre Reaktionen hinaus.

Die bis 2003 verwendete Einteilung brennbarer Flüssigkeiten nach ihren Flammpunkten in „Gefahrklassen“ gemäß der „Verordnung über brennbare Flüssigkeiten (VbF)“ sei kurz erwähnt, da entsprechend gekennzeichnete Behälter in Betrieben noch anzutreffen sind. Die heutige Einordnung erfolgt nach der „Betriebssicherheitsverordnung“.

Bedeutsam für die Verhütung von Explosionen sind auch die in den §§ 11 und 12 der *Gefahrstoffverordnung* genannten Maßnahmen.

Weiterhin sei „VdS 2106, Funkenerkennungs-, Funkenausscheidungs- und Funkenlöschanlagen, Planung und Einbau“ erwähnt; denn diese Richtlinie behandelt derartige Anlagen, die sich als wirksame Vorkehrungen gegen Explosionen in staubgefährdeten Anlagen erwiesen haben.

Dieses hier genannte Regelwerk von Schutzmaßnahmen basiert auf den Erkenntnissen, die über viele Jahre in entsprechenden Forschungslaboratorien und durch Untersuchungen von forensischen Sachverständigen gewonnen sind. Hierbei sind Gesetzmäßigkeiten gefunden und Messwerte gewonnen worden, die nicht den Charakter von physikalischen Gesetzen oder Naturkonstanten besitzen, aber durchaus eine nach dem jeweiligen Stand der Forschung bestmögliche Erkenntnis darstellen. Es soll hier noch ein von M. Hattwig gelieferter Hinweis gegeben werden [11]: „Für einige hinsichtlich des Explosionsschutzes bedeutsame Zusammenhänge sind in der einschlägigen Literatur Formeln benannt worden. Diese sind häufig das Ergebnis einer mehr oder weniger gelungenen Anpassung an eine begrenzte Anzahl von Messergebnissen. Außerhalb des von den ursprünglichen Messungen erfassten Bereiches können sogar Phänomene auftreten, die mit der Formel allein nicht vorherzusagen sind. Bei der Anwendung solcher Formeln,

insbesondere bei Extrapolationen außerhalb des ursprünglich untersuchten Bereiches, sollte kein allzu großes Vertrauen in die Ergebnisse gelegt werden. Insbesondere muss davor gewarnt werden, daraus entscheidende sicherheitstechnische Schlussfolgerungen zu ziehen.“

Wärmeexplosion

In der chemischen Verfahrenstechnik müssen beim Führen von exothermen Reaktionen Maßnahmen zur Vermeidung einer *Wärmeexplosion* getroffen werden. Unter diesem Begriff werden hier Vorgänge bei Umsetzungen in der kondensierten Phase verstanden, die nach dem gleichen kinetischen Grundschema ablaufen wie die bereits erwähnten mit diesem Begriff belegten Explosionen in der Gasphase. Solche Explosionen ereignen sich vereinzelt in Anlagen zur Lagerung und Produktion chemischer Stoffe in industriellen Betrieben.

Es handelt sich insofern nicht um einen gesonderten Explosionstyp. Wenn sich ein solches Ereignis zu einem Schadensfall entwickelt, verläuft es in der Weise, dass der Lagerbehälter oder Reaktor aufgerissen wird oder dass Bruchstücke fortgeschleudert werden. In einzelnen Fällen wird der heiße Inhalt im Umfeld verspritzt, was zu weiteren Personen- und Sachschäden führen kann.

Solche Wärmeexplosionen in kondensierter Phase können also auftreten, wenn ein unkontrollierter Temperaturanstieg aufgrund quasi-adiabatischer Bedingungen zu Siede- und Zersetzungsreaktionen führt, so dass der Berstdruck des Gefäßes überschritten wird. Weiterhin kann der Zerfall von instabilen Stoffen in Lagerbehältern in gleicher Weise zu einer solchen Explosion führen. Auslösend sein können Verunreinigungen oder Zusätze, die über eine katalytische Wirkung die Reaktion starten.

Schutzmaßnahmen gegen Wärmeexplosionen können in der Weise getroffen werden, dass kritische Temperaturen der Stoffe oder Stoffgemische deutlich unterschritten und dass katalytisch wirksame Stoffe ferngehalten werden. Weiterhin können Berstscheiben und Sicherheitsventile einen kritischen Druckaufbau verhindern. Werden allerdings die Auslegungsdaten solcher Ventile (abzuführender Massenstrom; Entlastungsquerschnitt) überschritten, so können die Temperatur und der Druck im Behälter so weit ansteigen, dass die Reaktion „durchgeht“, sich also unbeherrschbar schnell beschleunigt. Besonders problematisch wird die Situation, wenn ein zweiphasiges Abströmen von aufschäumenden Flüssigkeiten durch das Ventil bewältigt werden muss. Zwei umfangreiche Arbeiten liefern hierzu viele Informationen [12], [13].

4.7.3.3 Sonstige Explosionsphänomene

BLEVE ist das Acronym für „Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion“, welches den Mechanismus nur unvollkommen benennt. Eine solche Explosion ereignet sich nicht selten dann, wenn Behälter, die druckverflüssigte Gase enthalten, stark von einem Feuer beansprucht werden. Sobald eine erste Druckentlastung über eine Leckstelle erfolgt, kann es zu einem Siedeverzug kommen, bei dem durch das Phänomen der Blasenresonanzexplosion ein solcher Überdruck entsteht, dass der Behälter zerlegt wird und der freigesetzte Inhalt in einem Feuerball abreagiert. Ist das druckverflüssigte Gas unbrennbar wie Kohlendioxid, so erfolgt nur diese heftige Form der Physikalischen Explosion. C.-

O. Leiber hat in der genannten Monographie „Assessment of Safety ...“ die Theorie dieses Phänomens beschrieben, er hat außer dort auch in [5] viele solche Explosionsfälle beispielhaft beschrieben.

Dampfwolkenexplosion, engl.: „Vapour Cloud Explosion“, abgekürzt „VCE“, präzisiert im angelsächsischen Bereich als „Unconfined Vapour Cloud Explosion“, bezeichnet. Eine solche Explosion tritt nach Ausfließen oder Ausschütten brennbarer Flüssigkeiten auf Oberflächen mit weit entfernten oder ohne seitliche Begrenzungen, wie Wände, Wälle usw., auf. Liegt der Flammpunkt der Flüssigkeit erheblich unterhalb der Umgebungstemperatur oder handelt es sich um druckverflüssigte Gase, so erfolgt die Bildung einer größeren Dampfmenge und deren Vermischung mit Luft relativ schnell, und es ist nach Zündung mit dem Auftreten eines erheblichen Überdruckes zu rechnen, allerdings fällt dieser wesentlich niedriger aus gegenüber einer stärker verdammtten Situation, wie in engen Straßen oder in Tunneln, oder bei einer typischen Raumexplosion. Ausführlich wird dieser Typ in der Monographie von Guban beschrieben.

Explosion instabiler chemischer Substanzen, ist ein Explosionstyp, der sich im physikalischen und chemischen Ablauf nicht von der Explosion von Explosivstoffen unterscheidet. Allerdings sind diese Stoffe nicht als solche gefertigt und zu bezeichnen.

4.7.4 Wirkungen von Explosionen

Eine Explosion übt durch den auf die Umgebung vermittelten Druck sowie durch die – im Falle einer chemischen Explosion – übertragene Wärme Wirkungen auf die Umgebung aus. Weiterhin können Splitter oder Trümmer eines zerstörten Behälters oder Gebäudes entstehen und sekundäre Schäden auslösen.

Einige Wirkungen seien beispielhaft angeführt, und zwar

auf Menschen und Tiere wie:

- Zerstückelung von Körpern,
- Zerreißen von Gefäßen wie Lungen und Arterien,
- Platzen von Trommelfellen,
- Versengen der Haut, ferner

gegenüber Objekten wie:

- Ausbildung von Kratern,
- Zermahlen fester Materialien,
- Zerreißen von Blechen in Stücke,
- Zersplittern von Glas,
- Versengen von hölzernen Oberflächen.

Von dem Zentrum der Explosion, ob es sich um eine physikalische oder chemische Explosion handelt, geht eine Stoßwelle aus. In vereinfachter Weise lässt sie sich durch die folgende Kurve darstellen:

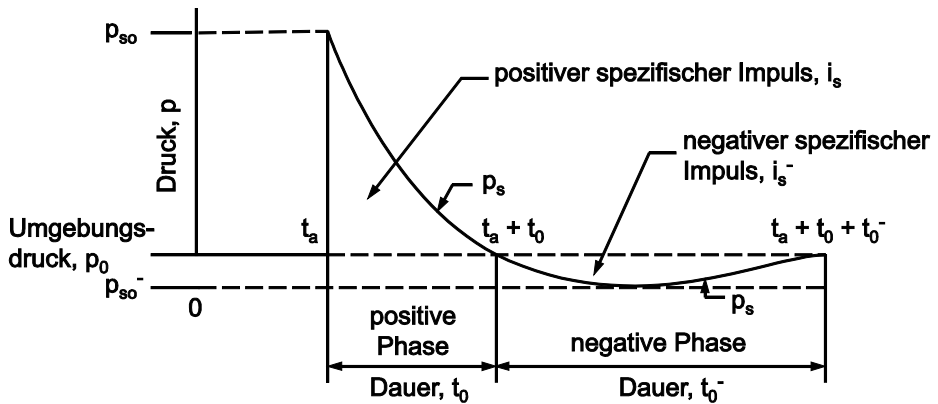


Abb. 29: Druck/Zeit-Verlauf bei Explosionen (nach C.O.Leiber [5])

Nach abruptem Druckanstieg fällt der Überdruck exponentiell ab, unterschreitet den Umgebungsdruck, durchläuft eine schwach ausgeprägte Negativdruck-Phase und steigt wieder an.

Eine solche Stoßwelle kann durch zwei unterschiedliche Effekte Schäden hervorrufen. Ist die Dauer der positiven Phase der Druckkurve, dargestellt in einem Druck-Zeit-Diagramm, kurz gegenüber der „kritischen Zeit“ einer Schädigung, so ist die Größe des *Impulses*, also des Integrals der Fläche unter Kurve bis zu deren Nulldurchgang, entscheidend. Ist dagegen die Zeitdauer der positiven Phase lang gegenüber der „kritischen Zeit“, so beruht die Wirkung auf der Größe des *Überdruckes* (quasi-statische Wirkung). Auf die umfangreiche Monographie von Kinney et al. sei hingewiesen.

Da die Wirkung von Explosionen in der Mehrzahl der Fälle durch den Überdruck erfolgt, wurde schon früh für die Wirkung von Sprengstoffen eine empirische Beziehung herangezogen. Werden dazu Werte für den Überdruck graphisch gegenüber der jeweiligen Größe, die mittels Division des Abstandes r vom Explosionszentrum durch die dritte Wurzel der Sprengstoff-Masse m , also $r m^{-1/3}$, erhalten wird, doppelt logarithmisch aufgetragen, so resultiert nahezu eine Gerade. Auf diese lassen sich dann typische Schadwirkungen von Explosionen einbringen [14].

Zur Vereinfachung hat man aus Versuchen mit verschiedenen Explosivstoffen ein jeweiliges TNT-Äquivalent bestimmt, so dass außer für das ‚TNT‘ auch für viele andere Stoffe ein solches Diagramm zum Zwecke von Schutzmaßnahmen oder aber bei der Ursachenerforschung verwendet werden kann.

Vor einigen Jahren ist der Versuch unternommen worden, auch auf Raumexplosionen im Freien, also auf Dampfvolken-Explosionen, ein entsprechendes Diagramm anzuwenden [15].

Eine kleine Auswahl von häufig auftretenden Explosionswirkungen ist in der folgenden kleinen Tabelle den jeweiligen Mindestwerten des Explosionsüberdruckes gegenübergestellt:

Überdruck I [bar]	Überdruck I [kPa]	Wirkungen an Lebewesen und an Objekten
3	~ 300	tödliche Verletzungen (50 %) bei Hunden
1,0 ... 1,4 ... 2,0	100 ... 140 ... 200	tödl. Verletzungen (50 %) bei Menschen
~ 0,6	~ 60	Zerstörung von Stahlskelettgebäuden
0,22 ... 0,44 ... 0,85	22 ... 44 ... 85	Trommelfellschaden bei Menschen
0,15 ... 0,27 ... 0,39	15 ... 27 ... 39	Zerstörung herkömmlicher Gebäude
~ 0,15	~ 15	Zerstörung von Fensterrahmen
~ 0,01	~ 1	Zerstörung von Fensterscheiben

Es ist bedeutsam darauf hinzuweisen, dass solche und andere Wirkungen von Explosionen innerhalb von Gebäuden im Allgemeinen dadurch entstehen, dass *lediglich* ein Teilvolumen des betroffenen Raumes mit einem explosionsfähigen Gemisch gefüllt war und dieses in sich auch *nicht völlig* homogen war. Insofern führen Rechnungen zu falschen Ergebnissen in Bezug auf die eingeströmte oder freigesetzte Menge brennbaren, dispersen Materials, nämlich zu einer Fehleinschätzung, wenn von der Voraussetzung einer völligen Erfüllung des Raumes mit dem Gemisch *und* ebenfalls von dessen Homogenität ausgegangen wird.

Wie eine Raumexplosion in des Wortes eigentlicher Bedeutung abläuft, insbesondere wie sich der Verlauf des Überdruckes im Augenblick der ersten Druckentlastung infolge Fortschleuderns eines Fensters und später beim Austritt einer „Stichflamme“ aus dieser Öffnung heraus, entwickelt, zeigt die folgende schematische Darstellung sehr anschaulich:

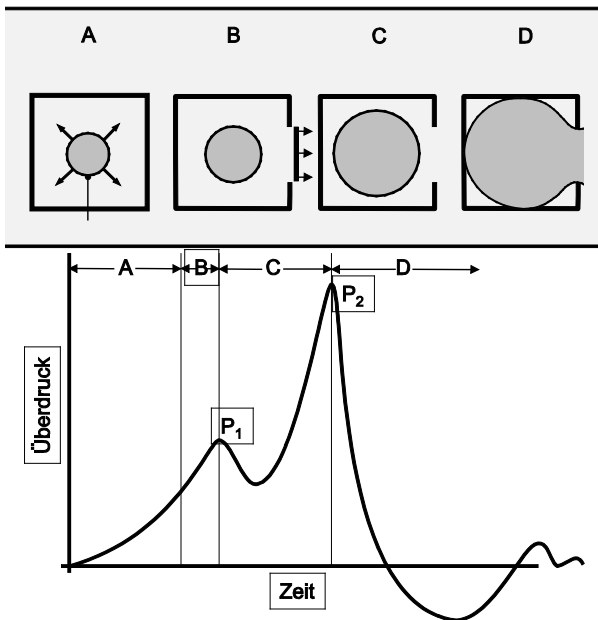


Abb. 30: Druck/Zeit-Verlauf bei Raumexplosionen (nach R.J.Harris)

Erläuterung zu den Phasen:

- A: Explosion startet in geschlossenem Raum
- B: entstandene Öffnung liefert erste Druckentlastung
- C: Druckentlastung entwickelt sich fort
- D: Explosionsflamme erfüllt Raum maximal und tritt ins Freie

4.7.5 Methodik der Explosionsursachenerforschung

Da Explosionen wegen ihrer starken Energiefreisetzen in vergleichbarer Weise wie Brände die für die Untersuchung zur Ursache bedeutsamen Spuren verändern oder auch vernichten können, gestalten sich die Untersuchungen oft als schwierig.

Für die Untersuchung von Explosionsfällen sollte im Regelfall wie nach Bränden das Eliminierungsverfahren verwendet werden. Allerdings sollte es in zwei Stufen zur Anwendung kommen, da der Erforschung der *Ursache* grundsätzlich diejenige des *Typs* der Explosion vorangehen sollte. Dieser erste Schritt wird analog durchgeführt, indem die im konkreten Fall denkbaren Explosionstypen einzeln daraufhin geprüft werden, ob sie mit den erkannten und untersuchten Spuren des Geschehens im Einklang stehen

oder nicht. Ergibt sich ein widerspruchsfreies Ergebnis nur für einen von allen denkbaren Typen, so ist der erste Schritt bereits erfolgreich erarbeitet. Anschließend ist durch eine zweite Eliminierung zu ergründen, welche Ursache das Ereignis ausgelöst hat.

An Explosionsstätten ist wie an Brandstätten eine differenzierende Beurteilung von doppeldeutig erscheinenden Spurenbildern erforderlich und auch häufig möglich. Spurenbilder einiger Explosionstypen sind so deutlich ausgeprägt, dass sie zur sicheren Zuordnung herangezogen werden können, womit der erste Eliminierungsschritt der Ursachenforschung in diesen Fällen bereits am Ort des Ereignisses gelingt.

So sind die Spuren von *Sprengstoff-Detonationen* im Allgemeinen markant: das Zentrum der Umsetzung ist entweder zermalmt („Malmzentrum“) oder zerbrochen oder zumindest bei metallenen Werkstoff deformiert. *Raumexplosionen* lassen zwar vielseitige Spuren einer Überdruckwirkung auf die Wandungen von Behältern oder Rohren oder auf Wände und Decken von Räumen erkennen, allerdings lässt sich das Zentrum einer solchen Explosion selten feststellen. In diesen beiden Fällen sind oft zusätzlich thermische Spuren erkennbar, besonders an Personen, Tieren und brennbaren Objekten. Nach einer *physikalischen Explosion* dagegen fehlen derartige Spuren. Bemerkenswert stark können aber die Spuren einer *Blasenresonanzexplosion* ausfallen; so können die hiervon betroffenen Behälterwandungen stark deformiert, zum Teil auch zertrümmert sein. Bei einem *BLEVE*-Ereignis mit brennbaren, druckverflüssigten Gasen treten sowohl solche wie auch thermische Spuren auf. *Dampfwolkenexplosionen* hinterlassen im Allgemeinen nur mäßig starke Spuren durch Überdruck, dagegen starke thermische Wirkungen.

In vielen Fällen ist der sichere Nachweis einer Ursache aber noch nicht am Ereignisort zu erbringen; weitere Untersuchungen von sichergestellten Spuren im Laboratorium liefern dann häufig die Lösung des Falles, in Einzelfällen kann ein sicheres Ergebnis erst nach Durchführung umfangreicher Versuchsreihen oder Rekonstruktionen einzelner Ereignisphasen erlangt werden. Schließlich sei noch darauf hingewiesen, dass es aber in einigen wenigen Fällen unmöglich ist, auch bei größtem Untersuchungsaufwand die Ursache zu finden. In solchen Fällen erweisen sich die Spuren des Ereignisses entweder als doppel- oder mehrdeutig, oder aber es fehlen zu deutende Spuren überhaupt.

Die Untersuchungen an Brand- und Explosionsstätten müssen von einer genauen Dokumentation aller Phasen der Untersuchung von Beginn an bis zur Sicherung der bedeutsamen Spuren begleitet sein. Hierfür sind insbesondere Photographie und Skizzierung der besonderen Spurenzusammenhänge unabdingbar. Es ist nach Explosionen in vielerlei Hinsicht in gleicher Weise vorzugehen, wie es sich bei der Untersuchung von Bränden als notwendig erwiesen hat. So muss unbedingt vermieden werden, dass Spuren, die oft latent sind, durch die Maßnahmen der Spurensuche und -sicherung selbst, aber auch durch Umwelteinflüsse verändert, verschleppt oder anderweitig vernichtet werden. Bei der wiederholten Begehung des Ereignisortes ist ein schmaler Weg („Trampelpfad“) einzuhalten, damit nur ein Minimum an Spuren verloren gehen kann. „Gesonderte Spurenbereiche“ sollten vorgesehen werden, damit die eindeutige Zuordnung von Spuren zu diesen Orten festgelegt ist. Nach Explosionen kann der abzusperrende Bereich viele hundert Meter umfassen, nicht selten sind noch in mehr als einem Kilometer Entfernung bedeutsame Spuren anzutreffen, beispielsweise infolge Trümmerwurfs oder durch die Druckwelle.

Hilfreich für die Ursachenerforschung können auch Feststellungen folgender Umstände sein: Gerüche, Strömungsgeräusche, Substanzverluste. Mittels Lecksuchmitteln (Seifenlauge) oder Lecksuchgeräten können vor dem Ereignis bereits Erkenntnisse gewonnen worden sein, aber auch nach der Explosion sind mit diesen Hilfsmitteln vereinzelt wichtige Ergebnisse in Hinblick auf die Ursache zu gewinnen.

Ein besonderes Risiko besteht darin, dass Reste von Explosivstoffen nicht transportfähig sein können und daher nur von entsprechenden Experten unter Beachtung der Gefahren für die Umgebung und der Eigensicherung gehandhabt werden dürfen.

Weiterhin ist die Gefahr durch sekundäre Raumexplosionen (beispielsweise durch Leckagen), ferner Nachverdampfungen, Auftreten giftiger Stoffe (zum Beispiel Kohlenmonoxid, aber auch Radioisotope) zu achten; denn wie bei der Untersuchung von Bränden gilt hier ein besonderes Augenmerk der *Eigensicherung* der Untersucher.

4.7.6 Literatur zu Explosion

Diese Literaturstellen beziehen sich auf die entsprechenden Ziffern in dem Text:

- [1] DIN 20163, Sprengtechnik; Begriffe, Einheiten, Formelzeichen (1994)
- [2] Leiber, C.-O.: Langsame Detonation, Dampfexplosion, Blasenresonanzexplosion – Gemeinsamkeiten, Chemie-Ing.-Technik 49 (1977), S. 925 ff.
- [3] Leiber, C.-O.: Physikalische Explosionen, Proc., 6. Intern. Brandschutz-Seminar der vfdb, Bd. II, 6.1, S. 177 ff., Karlsruhe 1982
- [4] Leiber, C.-O.: Blasenresonanzexplosion. Die Entwicklung einer Idee, Safety Science 16 (1993), Amsterdam, S. 549 ff.
- [5] Leiber, C.-O.: Explosion und Detonation – Stoffe, Ereignisse, Mechanismen, Risiken –, Swisttal 1995
- [6] Gesetz über explosionsgefährliche Stoffe (Sprengstoffgesetz– SprengG) in der Fassung vom 10.09.2002, zuletzt geändert am 22.12.2011
- [7] VDI-Richtlinie 2263, Staubbrände und Staubexplosionen; Gefahren, Beurteilung, Schutzmaßnahmen (1992)
- [8] Schön, G.: Ausbreitung explosibler Gemische, Erdöl und Kohle – Erdgas – Petrochemie 20 (1967), S. 714 ff., Abb. 1 und 4
- [9] Brandes, E. und W. Möller: Sicherheitstechnische Kenngrößen, Bd. 1, S. 6, Bremerhaven 2003
- [10] Strese, G.: Zündmöglichkeiten von brennbaren Gasen und Dämpfen durch glimmenden Tabak, Bundesanstalt für Materialprüfung, Berlin 1968

[11] Hattwig, M.: persönl. Mitteilg.

[12] Kommission für Anlagensicherheit (KAS), Technische Regel für Anlagensicherheit (TRAS 410), 2007

[13] Technischer Ausschuss für Anlagensicherheit (TAA) des Bundesministers für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Friedel, L., Anleitung zur strömungstechnischen Auslegung der Entlastungseinrichtungen für druckführende Anlagenteile (TAA-GS-18), Hamburg 1998, http://www.kas-bmu.de/publikationen/taa/taa_gs_18.pdf

[14] Strehlow, R.A. and W.E. Baker: The Characterisation and Evaluation of Accidental Explosions, NASA CR 134779, Urbana/ IL 1975

[15] Pilz, V.: Grundlagen für die Vorhersage der Auswirkungen von Störfällen, vfdB-Z. 3/81, 116 ff.

Die nachfolgend genannten Handbücher und Veröffentlichungen liefern weitere Informationen zu den jeweiligen Abschnitten:

Bartknecht, W.: Explosionen – Ablauf und Schutzmaßnahmen -, Heidelberg 1993

Beveridge, A.: Forensic Investigation of Explosions, 2nd ed., Boca Raton/ FL 2011

Explosionsschutz-Regeln (EX-RL), BGR 104, hrsg. von: Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung, Berlin 2009, <http://publikationen.dguv.de/dguv/pdf/10002/bgr104.pdf>

Freytag, H.H.: Handbuch der Raumexplosionen, Weinheim 1965

Gefahrstoffinformationssystem der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung, GESTIS-Stoffdatenbank, hrsg. von: Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA), Berlin, <http://www.dguv.de/ifa/de/gestis/stoffdb/index.jsp>

Gefahrstoffinformationssystem der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung, GESTIS-STAU-EX, Datenbank Brenn- und Explosionskenngrößen von Stäuben, hrsg. von: Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA), Berlin, <http://www.dguv.de/ifa/de/gestis/expl/index.jsp>

Gugan, K.: Unconfined Vapor Cloud Explosions, Houston/ TX 1979

Harris, R. J.: The Investigation and Control of Gas Explosions in Buildings and Heating Plant, London 1983

Hattwig, M. and H. Steen: Handbook of Explosion Prevention and Protection, Weinheim 2004

Keller, F.: Feuerwerk, Chemie in unserer Zeit 4/2012, 248 ff., Weinheim 2012

Kinney, G.F. and K.J. Graham: Explosive Shocks in Air, New York 1985

Köhler, J., Meyer, R., und A. Homburg: Explosivstoffe, Weinheim 2008

Leiber, C.-O.: Assessment of Safety and Risk with a Microscopic Model of Detonation, Amsterdam 2003

Leitfaden zur Durchführung der Richtlinie 1999/92/EG (ATEX 137) der Fachstelle für Explosionsschutz der Deutschen Montan-Technologie GmbH, Bochum 2003

National Fire Protection Association, Guide for Fire & Explosion Investigations, NFPA 921, Quincy/MA 2011

Richtlinie 2007/23/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Mai 2007 über das Inverkehrbringen pyrotechnischer Gegenstände, www.ce-richtlinien.eu/richtlinien/Pyr_Gegst.html

Steen, H.: Handbuch des Explosionsschutzes, Weinheim 2000

Technical Working Group for Bombing Scene Investigation of National Institute of Justice: Guide for Explosion and Bombing Scene Investigation, U.S. Department of Justice, Washington/DC 2000

Yallop, H.J.: Explosion Investigation, Harrogate 1980

Literatur

Böttle, P., Boy, G., Clausing, H.: Die Meisterprüfung, Elektrische Meßtechnik und Regeltechnik, 9. Auflage, Vogel-Verlag, Würzburg, 1998

Boy, H-G., Dunkhase, U.: Die Meisterprüfung, Elektroinstallationstechnik, 11. Auflage, Vogel-Verlag, 2002

Boy, H-G., Dunkhase, U.: Elektroinstallationstechnik, 13. Auflage, Vogel-Verlag, 2011

Bussenius, S.: Wissenschaftliche Grundlagen des Brand- und Explosionsschutzes, W. Kohlhammer Verlag, Stuttgart-Berlin-Köln, 1996

DeHaan, J.D.: Kirk's Fire Investigation, 5th edition, Brady/Prentice Hall Health/ Pearson Education, Upper Saddle River, New Jersey, 2002

Dehn + Söhne (Herausgeber): Blitzplaner, 2. Auflage, Dehn-Druckschrift Nr. DS702/2007, 2007

Dt. Ges. f. Holzforschung (Herausgeber): Holz Brandschutz Handbuch, Ernst & Sohn Verlag, Berlin, 2009

- Europa-Fachbuchreihe, div. Autoren: Fachkunde Elektrotechnik, 26. Auflage, Verlag Europa-Lehrmittel Nourney/Vollmer, Haan-Gruiten, 2008
- Folkerts, E., Baase, W., Friedrichs, S.H.: Die Meisterprüfung, Hausgeräte-, Licht- und Klimatechnik, 10. Auflage, Vogel-Business-Media/VM, Würzburg, 2000
- Häberle, H. O.: Einführung in die Elektroinstallation, 5. Auflage, Hüthig & Pflaum Verlag, München/Heidelberg, 2009
- Hamberger, W.: Sicherheitstechnische Kennzahlen brennbarer Stoffe, Die Roten Hefte 5, W. Kohlhammer Verlag, 1995
- Hösl, A., Ayx, T., Busch, H.W.: Die vorschriftsmäßige Elektroinstallation, Wohnungsbau-Gewerbe-Industrie, 19. Auflage, Hüthig Verlag, Heidelberg, 2009
- Icove, D.J., DeHaan, J.D.: Forensic Fire Scene Reconstruction, 2nd Edition, Pearson/Prentice Hall, 2009
- Kästle, H.: Brandstiftung, R. Boorberg Verlag, Stuttgart, München, 1992
- Kemper, H., Lemke, E. (Herausgeber); Handbuch Brandschutz, Loseblattwerk, 33. Aktualisierung, ecomed Sicherheit, Landsberg, 2011
- Klingsohr, K., Habermaier, F.: Brennbare Flüssigkeiten und Gase, Die Roten Hefte 41, 7. Auflage, W. Kohlhammer Verlag, Stuttgart, 2002
- Kuchling, H.: Taschenbuch der Physik, 20. Auflage, Carl Hanser Verlag, 2010
- Lang, W.: Brandstiftung an Kraftfahrzeugen, in Die Aufklärung des Kfz-Versicherungsbetrugs (hrsg. Weber, M.), 1. Auflage, Schriftenreihe Unfallrekonstruktion, Schimmelpfennig + Becke, Kap. 12, S. 571 - 628, 1995
- Mayr, J., Battran, L. (Herausgeber): Brandschutzatlas, Baulicher Brandschutz, Loseblattsammlung, 5 Bände, FeuerTRUTZ, Verlag für Brandschutzpublikationen, Köln, 2011
- Polthier, K.: Lexikon Brand- und Explosionsschutz, W. Kohlhammer Verlag, Stuttgart-Berlin-Köln, 1996
- Polthier, K.: Vorbeugender Brand- und Explosionsschutz, W. Kohlhammer Verlag, Stuttgart, 1998
- R. Bosch GmbH (Herausgeber), Kraftfahrtechnisches Taschenbuch, 26. Auflage, F. Vieweg & Sohn Verlag/GWV Fachverlage, Wiesbaden, 2007
- Rempe, A., Rodewald, G.: Brandlehre, 4. Auflage, Kohlhammer Verlag, 1997

Schildhauer, P.: Selbstentzündung ungesättigter Pflanzenöle auf saugfähigen Trägerstoffen, Wuppertaler Berichte zum Brand- und Explosionsschutz, Band 1, VdS Schadenverhütung, Köln, 2001

Tretzel; F.: Formeln, Tabellen und Wissenswertes für die Feuerwehr, Die Roten Hefte 18, W. Kohlhammer Verlag, Stuttgart, 2003

Weikert, F., Röbenack, K.-D.: Brandsicherheit beim Schweißen, Verlag Technik, Berlin – München, 1992

von Schwarz, E.: Handbuch der Feuer- und Explosionsgefahr, Feuerschutzverlag Ph. L. Jung, München, 1958

VDI-Wärmeatlas, Berechnungsblätter für den Wärmeübergang, VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen (Hrsg), 10. Auflage, Springer, Berlin, Heidelberg, 2006

5 Analytische Untersuchungen

5.1 Allgemeines

In der Analytischen Chemie werden die qualitative Zusammensetzung (*Qualitative Analytik*) und die quantitativen Gehalte (*Quantitative Analytik*) von Stoffen (*Materiebausteinen*) bestimmt sowie die zu den Bestimmungen erforderlichen Methoden entwickelt. Die Kenntnis der qualitativen Zusammensetzung ist dabei grundlegende Voraussetzung für die Durchführung quantitativer Analysen.

Auch die Ermittlung von Brandursachen wird durch analytische Untersuchungen entscheidend unterstützt, da der meistens qualitative Nachweis von brennbaren organischen oder auch anorganischen Materialien in Brandrückständen (*Brandbeschleunigungs-* bzw. *Brandlegungsmittel*) häufig einen eindeutigen und objektiven Hinweis auf eine vorsätzliche Brandstiftung ergibt. Diese analytisch ausgerichteten Laboruntersuchungen ergänzen oder bestätigen so die zuvor durchgeführten Brandortuntersuchungen. Oft ist auch erst nach einer Laboruntersuchung, aufgrund von Analyseergebnissen, eine gesicherte Aussage zur Brandursache möglich.

5.2 Untersuchungsmaterial

Die zu untersuchenden Materialien werden als *Probenmaterial* oder auch nur als *Probe* bezeichnet. Der Probennahme kommt eine große Bedeutung zu, da eine zu analysierende Probe stets mengenmäßig begrenzt ist. Sie sollte deshalb für das Untersuchungsmaterial repräsentativ sein und gleiche analytische Informationen wie das gesamte restliche Material enthalten.

Zu einer analytischen Untersuchung kommen zwar auch grundsätzlich anorganische Materialien, wie Salze, oxidische oder mineralische Verbindungen, Metalle u. a. in Frage, aber die meisten dieser Stoffe sind nicht brennbar oder schwer entzündlich und stehen daher seltener im Zusammenhang mit einer direkten Brandzündung. Sie werden in der Regel nur analysiert, um Zusatzinformationen zu liefern. Normalerweise besteht das Untersuchungsmaterial aus organischen, also brennbaren Substanzen.

Zu einer Brandlegung werden wegen der leichten Handhabbarkeit und der besseren Wirkungsweise bevorzugt brennbare Flüssigkeiten als Brandbeschleunigungsmittel („Brandbeschleuniger“) bzw. als Brandlegungsmittel verwendet. Durch diesen Einsatz wird nach einer Zündung der Abbrand von anderen brennbaren Materialien derart beschleunigt, dass deren Vollbrand wesentlich schneller als nach einer direkten Zündung eintritt. Aufgrund der universellen Verfügbarkeit und der besonderen Brandwirkung kommen in überwiegenderem Maße Kohlenwasserstoffgemische wie Ottokraftstoff (Benzin), Dieselloststoff bzw. Heizöl EL oder bestimmte Lösungsmittel und Alkohole als Brandlegungsmittel zum Einsatz.

Eine Übersicht über die häufigsten zur Brandlegung verwendeten brennbaren Flüssigkeiten bzw. Flüssigkeitsgemische gibt die folgende, tabellarische Zusammenstellung:

Tab.1: Häufige Brandlegungsmittel

Produkte der Erdöldestillation (Kohlenwasserstoffverbindungen)		
Benzine	Kohlenstoff-Anzahl	Bestandteile
Leichtbenzin (<i>Siedegrenzenbenzin</i>)	$C_4 - C_8$	Alkane (unverzweigte und verzweigte aliphatische Kohlenwasserstoffe)
Ottokraftstoff	$C_4 - C_{12}$	Aliphatische und aromatische Kohlenwasserstoffe
Kerosin (z. B. <i>Flugbenzin</i>)	$C_6 - C_{16}$	Aliphatische und aromatische Kohlenwasserstoffe
Mitteldestillate		
Petroleum Terpentinersatz	$C_8 - C_{16}$	überwiegend aliphatische, wenig aromatische Kohlenwasserstoffe
Schwerdestillate		
Dieselmotorkraftstoff Heizöl EL	$C_{10} - C_{23}$	überwiegend aliphatische verzweigte und unverzweigte, wenig aromatische Kohlenwasserstoffe
Sonstige		
Lösungsmittel (<i>Universalverdünnung</i> <i>Nitroverdünnung</i> u. a.)	C-Zahl variiert	Zusammensetzung unterschiedlich: aromatische, aliphatische Kohlenwasserstoffe, Alkohole, Ketone, Ester u. ä.
Alkohole (<i>Spiritus, Grillanzünder</i>)	C-Zahl variiert	Ethanol (vergällt), n- und i-Propanol u. a.

5.3 Analytische Verfahren bei der Branduntersuchung

Analytische, chemisch-physikalische Untersuchungen, die überwiegend in kriminaltechnischen Laboratorien durchgeführt werden, beeinflussen die Ursachenfindung im Rahmen der gesamten Brandursachenfeststellung oft in entscheidendem Maße. Zu den Untersuchungen können verschiedene analytische Methoden eingesetzt werden. Am häufigsten sind dabei aber gaschromatographische und gaschromatographisch-massenspektrometrische Verfahren. Andere chromatographische, spektroskopische und röntgenanalytische Methoden sowie Verfahren der Thermischen Analyse kommen auch, aber in geringerem Umfang, zur Anwendung.

5.3.1 Chromatographische Verfahren

Die anzuwendenden analytischen Untersuchungsmethoden müssen diese speziellen Gegebenheiten berücksichtigen und führen zu folgenden analytischen Fragestellungen:

Sind Rückstände brennbarer Flüssigkeiten (*Brandbeschleunigungsmittel*) nachweisbar?

Um welche Flüssigkeit handelt es sich?

Sind Individualmerkmale vorhanden, die weitere Aussagen, z. B. Materialvergleiche, ermöglichen?

Die analytische Untersuchung auf Rückstände brennbarer Flüssigkeiten (*Brandanalytik*) kann in drei Schritte gegliedert werden:

- 1. Schritt:** Probenvorbereitung/Probenaufbereitung
- 2. Schritt:** Analytische Bestimmung (Messung)
- 3. Schritt:** Auswertung und Bewertung der Messergebnisse

Aufgrund der physikalisch-chemischen Eigenschaften von brennbaren, zu einer Brandlegung geeigneten Flüssigkeiten (Siedepunkte, Dampfdrücke), werden zur analytischen Bestimmung fast ausschließlich gaschromatographische (GC)-Methoden angewendet.

5.3.1.1 Vortest und Probenaufbereitung

Durch die Brandwirkung wird nicht nur das Material des Brandobjektes zerstört, sondern mit fortschreitender Branddauer werden auch die für eine Ursachenfindung relevanten Materialsuren oder Spureträger vernichtet. Nachfolgende Untersuchungen und die daraus resultierenden Aussagemöglichkeiten werden dadurch erschwert und in extremen Fällen sogar unmöglich gemacht. Durch die Verbrennung organischer Materialien entstehen in größeren Mengen zahlreiche Pyrolyseprodukte, die spätere, insbesondere analytische Bestimmungen beeinflussen. Von dem verbrannten Material, der *Brand-schuttmatrix*, und eventuell höheren Konzentrationen an Pyrolyseprodukten müssen auch Spuren Mengen von brandfördernden Stoffen, die möglicherweise zu einer Inbrandsetzung verwendet wurden, nachgewiesen werden können. Eine effektive Probenaufbereitung, durch die zu bestimmende Substanzen möglichst zerstörungsfrei abgetrennt und aufkonzentriert werden, ist deshalb von entscheidender Bedeutung für die nachfolgende erfolgreiche analytische Untersuchung. Vor der eigentlichen Probenaufbereitung der zu analysierenden Proben können auch Voruntersuchungen, so genannte *Vortests*, mit einem geeigneten Gerät zur Konzentrationsabschätzung und zur Auswahl geeigneter Untersuchungsmethoden vorgenommen werden.

Vortest mit einem Photoionisationsdetektor

Die zur Suche nach brandfördernden Substanzen an Brandorten einsetzbaren mobilen Detektionsgeräte (engl. *Sniffer*) können auch zum Vortest von unbekanntem Materialproben im Labor verwendet werden. Je nach Detektorsystem kommen unterschiedliche Geräte zur Anwendung, die alle relativ unspezifisch reagieren. Zu diesen Detektorsystemen gehören: **Photo-Ionisations-Detektoren (PID)**, **Flammen-Ionisations-Detektoren (FID)**, **Ionen-Mobilitäts-Spektrometer (IMS)** und Gasdiffusionsdetektoren.

Am häufigsten werden auch hier Photoionisationsdetektoren eingesetzt (s. hierzu auch Kapitel 2).

Messungen mit einem PID besitzen einen Vorprobencharakter und ersetzen nicht den analytischen Nachweis. Voraussetzung für eine Detektion von Stoffsubstanzen ist, dass sie sich aufgrund ihrer Struktur und ihrer molekularen Eigenschaften durch das Prinzip der Photoionisation bestimmen lassen. Dabei erfolgt eine Summenmessung von überwiegend luftgetragenen Substanzen aromatischer Kohlenwasserstoffe bzw. anderer organischer Verbindungen. Der Photoionisationsdetektor arbeitet als ein kontinuierlicher Detektor und saugt die Umgebungsluft mittels einer Pumpe in eine Messkammer. Sie wird in der Messkammer mit UV-Licht einer hochenergetischen Gasentladungslampe durchstrahlt. Befinden sich Substanzen in der Luft, die durch die UV-Strahlung ionisierbar sind, entsteht im elektrischen Feld der Messkammer ein Stromfluss, durch den ein Kondensator aufgeladen wird. Der Entladestrom I ist dabei proportional zur Konzentration c der ionisierten Inhaltsstoffe. Er wird verstärkt und auf dem Display als Funktion der Konzentration, bei einigen Geräten auch zusammen mit einem Bargraph angezeigt (siehe nachfolgende Abbildung):

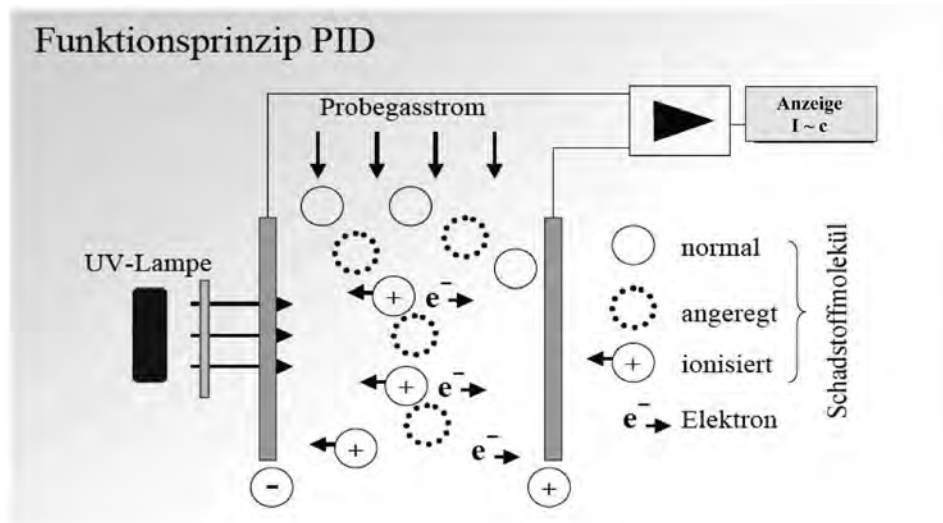


Abb. 1: Funktionsprinzip eines Photoionisationsdetektors

Die üblicherweise in diesen Detektorsystemen verwendeten Quarzlampen verfügen über eine Ionisationsenergie von 10,6 eV. Damit wird erreicht, dass Komponenten brennbarer Flüssigkeiten, z. B. von Ottokraftstoff, Dieseldieselkraftstoff oder Farbverdünner ionisiert und quantitativ angezeigt werden. Die normalen Bestandteile der Luft (Sauerstoff 12,08 eV, Argon 15,8 eV, Stickstoff 15,58 eV Ionisierungsenergie) werden hingegen von der eingebauten Gasentladungslampe nicht ionisiert. Der Messbereich von Photoionisationsdetektoren liegt zwischen 0,001 ppm und 1000 ppm (*parts per million*: Teilchen pro Million). Die Detektionssysteme zeigen nicht nur die Konzentration von Dämpfen bestimmter brennbarer Flüssigkeiten und von Gasen an, sondern auch einige der beim Brand gebildeten Pyrolyseprodukte. Ein Detektor-Signal kann daher immer nur als substanzspezifischer Vortest angesehen werden.

Probenaufbereitung

Die Probenmaterialien für Laboruntersuchungen, die möglicherweise zu einer Brandlegung eingesetzt wurden, bestehen aus Rückständen des verbrannten Materials bzw. aus den brennbaren Flüssigkeiten selbst.

Flüssigkeitsproben lassen sich mit einfacheren Methoden direkt in einem Gaschromatographen untersuchen. Eine direkte analytische Messung der komplex zusammengesetzten Brandschuttmatrix zum Nachweis brennbarer Flüssigkeitsrückstände ist mit der Gaschromatographie, aber auch mit anderen chromatographischen oder spektrometrischen Analyseverfahren nicht möglich.

Die durchzuführende Analytik wird von zwei Gesichtspunkten bestimmt:

Durch die Brandeinwirkung sind große Mengen der nachzuweisenden, meist leichter flüchtigen Substanzen verbrannt oder verdampft, so dass auf Spuren Mengen ausgerichtete gaschromatographische Verfahren anzuwenden sind.

Während des Brandes sind zahlreiche Pyrolyseprodukte in oder an dem verbrannten Material entstanden, die Nachweis und Identifizierung von Restmengen brennbarer Flüssigkeiten beeinflussen.

Ziel und Zweck von Probenaufbereitungsverfahren ist die Abtrennung der zu bestimmenden Substanzen von der Brandschutt-Matrix sowie die möglichst weitgehende Anreicherung („Aufkonzentration“) dieser Komponenten, neben den immer vorhandenen Pyrolyseprodukten und anderen, aus den verbrannten Materialien gebildeten, störenden Bestandteilen.

Im sehr komplexen Gebiet der Rückstandsanalytik brennbarer Flüssigkeiten können je nach Untersuchungsziel und Probenbeschaffenheit unterschiedliche Probenaufbereitungs-Methoden zur Anwendung kommen. Es werden bzw. wurden in analytischen Laboratorien, die Brandlegungsmittel untersuchen, Destillations-, Extraktions- und/oder verschiedene Headspace- (HS-) Verfahren eingesetzt.

Destillation

Destillationsverfahren gehören zu den ersten und damit ältesten Probenaufbereitungsmethoden, die in der analytischen Untersuchung von Brandrückständen angewendet wurden bzw. noch in wenigen Fällen eingesetzt werden. Es wird dabei unterschieden zwischen einer Vakuum-Tieftemperatur-Destillation und einer Dampf-Destillation, meistens der Wasserdampf-Destillation.

Bei der Vakuum-Destillation wird die zu untersuchende Probe in einem geeigneten Behälter an eine speziell zusammengestellte Vakuum-Destillationsapparatur angeschlossen und bei Umgebungstemperatur oder unter leichtem Erwärmen durch Anlegen eines Hochvakuums destilliert. Das Destillat wird in einer oder mehreren Kühlfallen (z. B. mit *Trockeneis/Ethanol*, *flüssigem Stickstoff*) aufgefangen. Es enthält neben den zu bestimmenden Substanzen größere Mengen an kondensiertem Wasser aufgrund der Feuchtigkeit der Ausgangsprobe sowie die destillierbaren Matrix- und Pyrolysebestandteile. Vor der eigentlichen chromatographischen Bestimmung ist daher noch ein weiterer Aufbereitungsschritt mit einem der nachfolgend angeführten Verfahren erforderlich.

Bei der Wasserdampf-Destillation wird die zu untersuchende Probe mit Wasser in einen geeigneten Behälter, meistens einem Destillierkolben, gegeben, an eine Dampf-Destillations-Apparatur angeschlossen und bis zur Erzeugung eines konstanten Dampfstroms erhitzt. Das Kondensat aus Wasser und den zu bestimmenden Substanzen wird in einer gekühlten Vorlage aufgefangen. Bei der Abtrennung und der Anreicherung von Kohlenwasserstoff-Verbindungen durch eine Wasserdampf-Destillation werden die relativ hohen Dampfdrucke und die nicht Mischbarkeit von Wasser mit diesen Kohlenwasserstoff-Verbindungen ausgenutzt. In der gekühlten Vorlage scheiden sich die abdestillierten Kohlenwasserstoffe, je nach Rückstandsmenge in der Ausgangsprobe, als organische Phase oder als dünner, häufig nicht erkennbarer Film auf der wässrigen Phase ab. Vor einer chromatographischen Analyse muss diese organische Phase abgetrennt und eventuell getrocknet werden. Bei sehr dünnen Filmen oder bei nicht erkennbaren Mengen auf der wässrigen Phase sind weitere Aufbereitungsschritte, z. B. eine Lösungsmittel-Extraktion, erforderlich. Wasserlösliche polare Verbindungen, wie Alkohole oder Ketone, werden durch die Wasserdampf-Destillation sehr effektiv abgetrennt, sind aber in der kondensierten Wasserphase gelöst, so dass auch in diesen Fällen weitere Trennschritte vorgenommen werden müssen.

Die zur Probenaufbereitung anwendbaren Destillationsverfahren erfordern einen hohen apparativen Aufwand und sind sehr arbeits- und zeitintensiv. Hochsiedende Komponenten werden bei einer Destillation nicht oder nur in sehr geringen Mengen abgetrennt, empfindliche Substanzen können dabei zerstört werden. Die Destillationsverfahren können aber in einem ersten Schritt zu einer Vortrennung flüchtiger Verbindungen von einer Matrix, einem so genannten „*clean-up*“, eingesetzt werden.

Extraktion

Extraktionsverfahren zur Abtrennung und Anreicherung brennbarer Flüssigkeitsrückstände aus einer Brandschuttmatrix gehören zu den am längsten in analytischen Laboratorien angewendeten Probenaufbereitungsmethoden. Bei dieser so genannten Lösungsmittel-Extraktion („*solvent extraction*“) werden die zu untersuchenden Probenmaterialien mit möglichst geringen Mengen eines geeigneten Lösungsmittels, dem Extrakti-

onsmittel, vermischt bzw. übergossen, so dass ein intensiver Kontakt entsteht und die zu analysierenden Bestandteile herausgelöst werden können. Der Lösungsmittelextrakt wird abgetrennt, kann bei Bedarf durch schonendes Einengen aufkonzentriert und dann direkt chromatographisch untersucht werden.

Die zur Extraktion einsetzbaren Lösungsmittel müssen ein möglichst gutes Lösungsvermögen für die häufigsten zur Brandlegung verwendeten brennbaren Flüssigkeiten haben und sollten nicht mit Wasser mischbar sein, da die zu extrahierenden Materialproben fast immer durch Löschwasserreste durchfeuchtet sind. Bei der Auswahl geeigneter Extraktionsmittel sind auch Sicherheitsaspekte, mögliche Gesundheitsgefährdungen und die Umweltverträglichkeit von Bedeutung.

Da zu einer Brandlegung am häufigsten Kohlenwasserstoff-Verbindungen zum Einsatz kommen, werden für Probenmaterialien mit solchen Rückständen als Extraktionsmittel bevorzugt die aliphatischen Kohlenwasserstoffe n-Pentan, n-Hexan oder n-Heptan eingesetzt, die alle in hochreiner Qualität zur Verfügung stehen und die über ein gutes Lösungsvermögen für die meisten abzutrennenden Stoffe verfügen. Auch Schwefelkohlenstoff (*Kohlenstoffdisulfid* – CS_2), Chloroform (*Trichlormethan* – $CHCl_3$), Dichlormethan (*Methylenchlorid* – CH_2Cl_2) oder Diethylether ($C_2H_5-O-C_2H_5$) werden aufgrund ihrer universellen Lösungseigenschaften, insbesondere auch für polare Verbindungen und ihrer im Vergleich zu Wasser höheren Dichte verwendet, obwohl sie zu den umwelt- und gesundheitsgefährdenden Stoffen gehören.

Die Lösungsmittel-Extraktion eignet sich besonders zur Abtrennung von höher siedenden Verbindungen, wie z. B. Dieselmotoröl oder Motoröl, von einer Brandschuttmatrix, da bei der nachfolgenden gaschromatographischen Bestimmung die höhere Konzentration eines deutlich tiefer siedenden Lösungsmittels nicht stört. Tiefer siedende Verbindungen werden aber nach der Extraktion durch das Lösungsmittel überlagert, so dass ihre gaschromatographische Bestimmung nur eingeschränkt oder gar nicht möglich ist. Grundsätzlich hat der Verdünnungseffekt durch das Lösungsmittel bei der Probenaufbereitung durch Extraktionsverfahren immer eine Verringerung der Nachweisempfindlichkeit zur Folge. Als weiterer Nachteil ist die Mitextraktion von löslichen Matrixbestandteilen und von Pyrolysekomponenten anzusehen.

Headspace-Verfahren

Nach der steten, sehr schnell fortschreitenden apparativen Verbesserung der Gaschromatographie(GC)-Systeme und insbesondere nach Entwicklung und Einführung der Kapillarsäulen („*fused silica capillary column*“) in die gängige GC-Untersuchungstechnik waren bei stark erniedrigten Nachweisgrenzen und gesteigerter Selektivität nur noch deutlich geringe Substanzmengen für die einzelnen gaschromatographischen Bestimmungen erforderlich. Aufgrund dieser veränderten Anforderungen traten die so genannten *Headspace*-Techniken (*HS-Techniken*) zur Probenaufbereitung in den Vordergrund. Sie werden deshalb in fast allen analytischen Laboratorien als Standardverfahren bei der GC eingesetzt.

Bei den HS-Techniken wird der relativ hohe Dampfdruck der meisten zur Brandlegung geeigneten brennbaren Flüssigkeiten zur Abtrennung und zur Anreicherung der zu bestimmenden Komponenten aus der Gasphase, dem „Dampfraum“ (*engl.: headspace*),

oberhalb einer Probe im Probenbehälter genutzt. Die Verfahrensweise ist einfach. Das Probenmaterial, meistens Brandschutt mit Rückständen brennbarer Flüssigkeiten, befindet sich in einem gas- und dampfdichten Behältnis. Verdampfbare Bestandteile reichern sich entsprechend ihrem Dampfdruck in Abhängigkeit von der Temperatur im Dampfraum an und können direkt bzw. über adsorbierende Medien abgetrennt werden.

Direkte Headspace

Die direkte oder auch einfache Headspace-Probenabtrennung ist die klassische und die am einfachsten durchführbare Methode aller Headspace-Verfahren. Sie wird seit Beginn der gaschromatographischen Brandanalytik angewendet, ist in kurzer Zeit, unkompliziert und ohne besonderen apparativen Aufwand auszuführen.

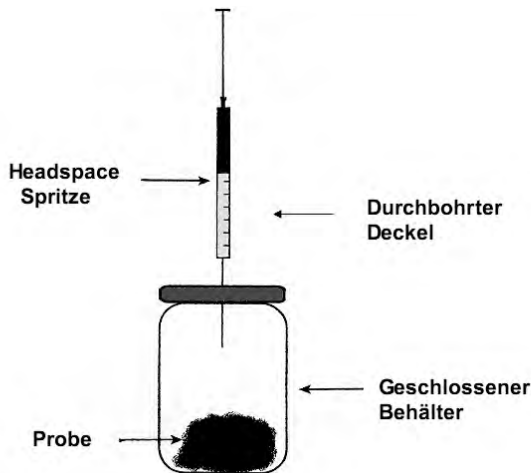


Abb. 2: Probenahme mit direkter Headspace

Zur Probenahme wird eine gasdichte und kalibrierte Spritze (*Headspace-Spritze*) verwendet. In den Deckel eines Probenbehälters wird ein kleines Loch gebohrt, die Headspace-Spritze eingeführt und damit ein bestimmter Volumenanteil aus dem Dampfraum herausgezogen (s. obige Abbildung). Ein Verbundfolienbeutel kann dazu direkt durchstochen werden. Die entnommenen Probevolumina, üblicherweise zwischen 100 μl bis 1000 μl , werden dann direkt in ein GC-Injektor-System (siehe Abb. 6) eingespritzt.

Nach der Probenentnahme wird das Loch in den Behältnissen mit einem lösemittelfreien Klebeband verschlossen. In Kunststoff- oder Metalldeckel kann auch ein größeres Loch geschnitten und unter Verwendung von lösemittelfreiem Kleber ein Septum eingefügt werden. Dadurch ist die Wiederholung von Probenahmen einfacher möglich.

Die bei Raumtemperatur durchgeführte Headspace-Probennahme eignet sich nur zur Abtrennung und zur Bestimmung von leichter flüchtigen, bis etwa 100 °C siedenden Stoffen. Für höher siedende Substanzen besteht nur eine geringe oder keine Nachweisempfindlichkeit.

Zur Erhöhung der Nachweisempfindlichkeiten schwerer flüchtiger Komponenten (z. B. Heizöl EL oder Dieselkraftstoff) kann eine direkte Headspace-Probenahme auch bei höheren Temperaturen von 60 °C bis max. etwa 90 °C durchgeführt werden. Dazu wird der Behälter mit dem Probenmaterial in einem Wärmeschrank oder mit einem Heizmantel auf die festgelegte Temperatur erhitzt. Nach der Gleichgewichtseinstellung wird mit einer Spritze ein Volumenanteil entnommen und direkt in das GC-Injektorsystem eingespritzt. Beim Erhitzen ist eventuell für einen Druckausgleich über ein Ventil oder über eine Belüftungsmöglichkeit zu sorgen. Um eine Kondensation der verdampften Substanzen in der HS-Spritze zu vermeiden, sollte diese mit auf die Proben temperatur erhitzt werden.

Die direkten Headspace-Probenahmetechniken sind schnell und einfach, ohne größeren apparativen Aufwand durchzuführen. Im Vergleich mit allen anderen Aufbereitungsmethoden sind hierbei die Störeffekte durch Feststoffe am geringsten, obwohl sie beim Erwärmen stärker werden können. Sie eignen sich in erster Linie zur Abtrennung leichter flüchtiger Komponenten, aber nicht oder nur sehr eingeschränkt für schwer flüchtige Bestandteile. Ein weiterer Nachteil dieser Techniken ist, dass abgetrenntes Probenmaterial verbraucht wird, und so keine Aufbewahrung für eine Wiederholungsanalyse oder für die Anwendung einer anderen Methode möglich ist.

Adsorptions-/Elutions-Methoden

Die Verbesserung der Nachweisempfindlichkeit und der Nachweisgrenzen in der gaschromatographischen Analytik von Brandlegungsmitteln war Anlass, auch Headspace-Verfahren zu entwickeln, die eine effizientere Abtrennung und eine höhere Konzentration von brennbaren Flüssigkeiten über die Dampfphase ermöglichten. Daraus entstanden die Adsorptions-Techniken (*Adsorptions-/Elutions-Verfahren*), bei denen die Dämpfe brennbarer Flüssigkeiten an der Oberfläche geeigneter fester oder auch flüssiger Materialien, *dem Adsorbens*, angelagert (*adsorbiert*), aufkonzentriert und thermisch oder durch Extraktion mit einem Lösungsmittel eluiert (*desorbiert*) werden.

Je nach Durchführung wird zwischen dynamischen und statischen (passiven) Headspace-Verfahren unterschieden.

Dynamische Headspace

Bei der dynamischen Headspace-Probenaufbereitung werden die verdampfbaren und in der Gasphase angereicherten Bestandteile der zu analysierenden Probe in einem dynamischen Prozess auf das Adsorptionsmaterial (*Adsorbens*) übertragen. Dazu wird über Zuleitungen ein mit einem geeigneten Adsorbens gefülltes, aber gasdurchlässiges Röhrchen außerhalb des Probenbehälters angebracht. Zur Abtrennung der Gasphase wird über das Röhrchen mit einer Pumpe ein leichtes Vakuum erzeugt oder durch Probengefäß und Adsorptionsröhrchen wird ein Trägergas, Luft oder Stickstoff, geleitet. Der Behälter und das Probenmaterial werden dabei üblicherweise auf 70 °C bis 90 °C erwärmt. Diese Aufbereitungstechnik wird im englischsprachigen Bereich als *purge and trap* bezeichnet.

Als Adsorptionsmaterial wird bei diesem Aufbereitungsverfahren fast ausschließlich fein granuliert Aktivkohle (*activated charcoal*) verwendet, weil andere, synthetische poröse Materialien, wie CHROMOSORB® oder TENAX® keine so universelle Eignung für die

infrage kommenden Brandlegungsmittel aufweisen. Apparative Vorrichtungen mit speziellen Probengefäßen, Anschlussleitungen und Adsorptionsröhrchen lassen sich einfach herstellen, können aber gebrauchsfertig, auch im Mikromaßstab für geringe Probemengen, erworben werden.

Die Desorption adsorbierter Substanzen (*Adsorbate*) kann thermisch oder durch Eluieren mit einem Lösungsmittel erfolgen. Wegen der starken Bindung an die Oberfläche von Aktivkohle werden die Proben mit einem Lösungsmittel extrahiert. Eine thermische Desorption würde sehr hohe Temperaturen erfordern, durch die möglicherweise schon Verbindungen zerstört werden können. Das am häufigsten verwendete und auch über weite Bereiche am besten geeignete Lösungsmittel zur Extraktion der Aktivkohle ist Schwefelkohlenstoff, der wegen seiner umwelt- und gesundheitsschädigenden Eigenschaften aber umstritten ist. Substitutionsversuche haben ergeben, dass auch Diethylether (mit Hinblick auf Umweltverträglichkeit und Handling) zur Elution geeignet ist.

Die oben angeführte sehr laborintensive dynamische Headspace-Methode wird in zahlreichen amerikanischen und europäischen Laboratorien durch Einsatz von TENAX[®] als Adsorbens in gebrauchsfertigen Tenax-Metallröhrchen durch Modifikation des Dynamisierungsprozesses vereinfacht.

Das vorbereitete Tenaxröhrchen wird in die Halterung einer Speziälspritze, zwischen einem größeren Hubkolben (20 bis 100 ml) auf der einen und der Injektionsnadel auf der anderen Seite der Halterung, eingesetzt. Der Behälter mit der zu untersuchenden Probe wird auf 60 °C – 80 °C erwärmt. Nach Erreichen der Temperatur wird die Nadel der Spritze durch ein kleines Loch oder durch ein zuvor in den Deckel des Behälters eingesetztes Septum eingestochen. Aus dem Dampfraum über dem Probenmaterial kann dann ein Volumenanteil bis zu 100 ml mit der Spritze durch das Röhrchen gesaugt werden. Diese Probenahme ist in der Durchführung mit der direkten Headspace-Technik vergleichbar, nur dass hier durch den Adsorptionsschritt eine bis zu 100 mal größere Probenmenge abgetrennt und analysiert werden kann.

Nach der Probenahme wird das Adsorptionsmaterial direkt vor dem Injektionssystem eines Gaschromatographen thermisch desorbiert. Für diese Thermodesorption gibt es spezielle automatische Thermo-Desorptions-Systeme, die in das gaschromatische Analysesystem integriert sind und auch automatisch und rechnergesteuert arbeiten.

Die dynamische Headspace-Adsorption mit Aktivkohle ist zwar sehr effizient, erfordert aber relativ viel Zeit, in der die Durchführung beaufsichtigt werden muss. Die Kohlenwasserstoffe im Bereich von C₅- bis C₁₈ lassen sich gut abtrennen. Auch Verbindungen mit höheren Kohlenwasserstoffen als C₂₀ können noch analysiert werden, wenn bei höheren Temperaturen eine ausreichende Überführung in die Gasphase möglich ist. Für die Abtrennung sehr leicht flüchtiger Kohlenwasserstoffe und für sauerstoffhaltige Verbindungen (Ethanol, Aceton) ist die Methode nicht gut bzw. gar nicht geeignet. Bei der Adsorption mit Tenax werden polare und auch unpolare Verbindungen gleichermaßen abgetrennt, allerdings die tiefer siedenden sauerstoffhaltigen Komponenten mit geringerer Effizienz. Die Tenax-Methode ist viel schneller durchzuführen und führt zu höheren Adsorbat-Konzentrationen, da wegen der Thermodesorption keine Verdünnungseffekte durch ein Extraktionsmittel auftreten.

Statische (passive) Headspace

Bei den dynamischen Headspace-Verfahren wird die Gleichgewichtseinstellung zwischen Adsorbens und dem gasförmigen Adsorbat durch einen erzwungenen Materialtransport aufgrund eines Trägergasflusses oder eines Vakuums bewirkt. Die Probenabtrennung über die Gas- oder Dampfphase erfordert aber nicht zwingend einen derartigen dynamischen Materialtransport, sondern eine Gleichgewichtseinstellung ist auch statisch (bzw. passiv) allein durch Diffusion der Gasmoleküle zum Adsorbens in Abhängigkeit von der Temperatur und der Zeit möglich.

Statische Headspace mit Aktivkohle

Die statische (oder auch passive) Headspace-Technik unter Verwendung von Aktivkohle als Adsorbens ist noch die am häufigsten in europäischen und amerikanischen Laboratorien angewendete Probenaufbereitungsmethode in der Bandanalytik. Sie ist besonders effektiv zur Abtrennung der $C_5 - C_{18}$ - Kohlenwasserstoffe über die Gasphase aus einer Brandschuttmatrix (s. o.). Das Verfahren ist relativ einfach durchzuführen und erfordert keinen größeren apparativen Aufwand. Die prinzipiellen Arbeitsschritte sind:

Fein granuliert Aktivkohle 100 mg bis 200 mg wird in einer gasdurchlässigen Vorrichtung (engl. *trap*) in den Gasraum des Probenbehälters eingebracht.

Der geschlossene Probenbehälter wird erwärmt und solange bei der gewählten Temperatur belassen, bis sich das Gleichgewicht eingestellt hat bzw. der Adsorptionsvorgang abgeschlossen ist.

Danach wird die Aktivkohlevorrichtung entnommen, mit einem Lösungsmittel eluiert und der Extrakt gaschromatographisch vermessen.

Als Aktivkohleträger werden üblicherweise Streifen aus inertem Polymer-Material, die mit der Aktivkohle beschichtet sind, so genannte *carbon strips*, verwendet. Danach wird diese Aufbereitungsmethode auch als *Carbon-Strip-Methode* bezeichnet. Speziell für die Probenaufbereitung in der Analytik von Brandlegungsmitteln ist unter dem Handelsnamen DEFLEX[®] ein Aktivkohlestreifen entwickelt worden, der in eine Metallfassung eingefügt ist, die mit einer partikel- und wasserabweisenden aber gasdurchlässigen Mikrofasermembran verschlossen ist.

Die Adsorptionstemperaturen zur passiven Gleichgewichtseinstellung liegen zwischen 60 °C bis 80 °C, die Kontaktzeit beträgt dabei 8 h bis 18 h. Nach der Adsorption ist eine chemische Desorption der Adsorbate durchzuführen, da eine thermische Desorption der Aktivkohle hohe Temperaturen, bei denen bereits bestimmte Verbindungen zersetzt werden können, erfordern würde (s. Dynamische Headspace).

Das zur Desorption geeignete Lösungsmittel muss über eine hohe Affinität zu den adsorbierten Substanzen verfügen und gleichermaßen polare und unpolare Verbindungen desorbieren können. Das in dieser Hinsicht wirksamste Lösungsmittel mit dem größten Elutionsvermögen ist nach wie vor Schwefelkohlenstoff. Als alternative Lösungsmittel wurden auch bereits Diethylether, Dichlormethan, Pentan, Hexan, Isopropanol u. a. eingesetzt, die aber jeweils nur für bestimmte adsorbierte Verbindungen Vorteile bieten und nicht die universellen Eigenschaften von Schwefelkohlenstoff aufweisen. Nach dem

Eluieren des Aktivkohlestreifens mit 0,5 ml bis 1 ml Schwefelkohlenstoff wird ein Anteil des Eluates direkt gaschromatographisch untersucht. Meistens wird nur ein Teilstück des Streifens verwendet, um die Analysen wiederholen zu können

Die Vor- und Nachteile des Verfahrens sind mit denen der dynamischen Trennmethode vergleichbar. Diese Technik ist sehr effizient, aber weniger destruktiv und weniger zeitaufwändig, da der Adsorptionsvorgang nicht beaufsichtigt werden muss.

Festphasen-Mikro-Extraktion

Eine weitere, aufgrund des Adsorptionsvorganges zu den statischen (passiven) Headspace-Methoden zu zählende Probennahmetechnik ist die Festphasen-Mikro-Extraktion, die auch im deutschen Sprachgebrauch mit SPME (**S**olid-**P**hase-**M**icro-**E**xtraction) bezeichnet wird.

Die adsorbierende Trennphase, eine polymere, polare oder unpolare Verbindung wird als Flüssigkeitsfilm auf die Oberfläche einer Quarzfaser aufgebracht, so dass als Gesamtheit eine „Festphase“ entsteht. Diese beschichtete, etwa 1 cm lange Faser ist an dem unteren Ende einer Stahlnadel befestigt, die durch eine Hohlneedle geführt wird. Diese Hohlneedle dient zum Schutz sowie zum Ausstellen und Einziehen der Faser. Das ganze Nadelsystem sitzt in einem speziellen Halter und gleicht entfernt einer Headspace-Spritze. Das Aufbauprinzip ist in der folgenden Abbildung zu erkennen.

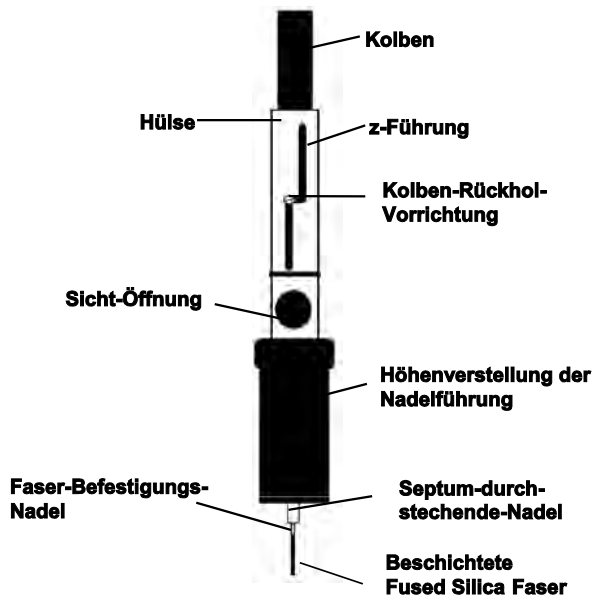


Abb. 3: SPME – Vorrichtung mit Halter (mit Genehmigung der Sigma-Aldrich Co.)

Zur Probennahme wird die Hohlneedle durch ein kleines Loch oder durch ein Septum im Deckel in den Gasraum des Probenbehälters eingeführt. Die Faser wird dann ausgestellt. Nach erfolgter Probennahme wird sie wieder in die schützende Hohlneedle einge-

zogen, der Halter vom Probenbehälter entfernt und die Hohlneedle in das Injektionssystem eines Gaschromatographen eingeführt. Zur analytischen Messung wird die Faser wieder ausgestellt und im Injektor thermisch desorbiert

Zurzeit werden mehrere, hinsichtlich der Polarität unterschiedliche SPME-Fasern angeboten, so dass für die Lösung des jeweiligen Analysenproblems eine optimale Auswahl getroffen werden kann. Zur Probenabtrennung in der Analytik brennbarer Flüssigkeiten kommen vor allem die unpolare PDMS-Faser (*Polydimethyl-siloxane*) und die etwas polarere Mischfaser aus PDMS und CARBOXEN[®] zum Einsatz. Die PDMS-Faser besitzt universelle Adsorptionseigenschaften und eignet sich für die Kohlenwasserstoffe des mittleren und höheren Siedebereiches, wobei die aromatischen Kohlenwasserstoffe stärker adsorbiert werden. Sie ist weniger geeignet für die leicht flüchtigen Kohlenwasserstoff-Verbindungen und für sauerstoffhaltige Substanzen, wie Ethanol oder Aceton. Die Carboxen-PDMS-Mischfaser verfügt im Vergleich dazu über eine wesentlich höhere Adsorptionsempfindlichkeit. Sie ist vor allem für leicht flüchtige Kohlenwasserstoffe und für polarere, sauerstoffhaltige Komponenten geeignet. Zusätzlich ist eine weitere Faser mit einem vernetzten Adsorptionsmaterial (50/30 µm Divinylbenzol/Carboxen/PDMS) entwickelt worden. Sie verfügt über ähnliche Adsorptionseigenschaften wie die Carboxen/PDMS-Faser.

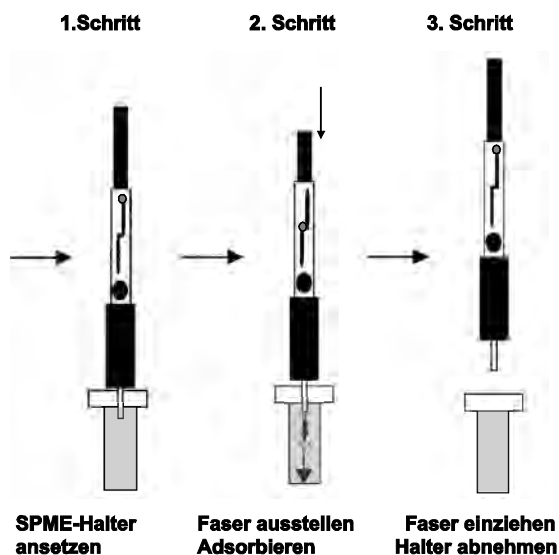


Abb. 4: Probennahme mit einer SPME-Vorrichtung (mit Genehmigung der Sigma-Aldrich Co.)

Die Probenabtrennung mit der SPME-Faser kann bei Raumtemperatur zur Abtrennung schwerer flüchtiger Komponenten, aber auch bei Temperaturen von 40 °C bis 80 °C, durchgeführt werden. Dabei ist zu beachten, dass bei den höheren Arbeitstemperaturen ein Teil der leichter flüchtigen Verbindungen wieder desorbiert werden kann. Die Adsorptionszeit beträgt für Standarduntersuchungen 5 min bis 10 min, kann aber auch auf 20 min

bis 60 min ausgedehnt werden. Zur Abtrennung flüchtiger Verbindungen wird die ausgesetzte Faser in die Gasphase über dem Probenmaterial gebracht, bei wässrigen Lösungen kann sie aber auch direkt in die flüssige Phase eingetaucht werden (s. Abb. 4).

Es gibt kein SPME-Fasersystem, das die Probennahme bei allen in Frage kommenden brennbaren Flüssigkeiten gleichermaßen gut löst und einen größeren Konzentrationsbereich abdeckt. Die Probenabtrennung ist schnell und unkompliziert durchzuführen. Sie lässt sich durch die Wahl von Adsorptionszeit und Adsorptionstemperatur steuern. Durch die begrenzte Adsorptionskapazität der Fasern wird die Nutzung der SPME-Methode als ein universelles Probenabtrenn- und Probenaufbereitungsverfahren eingeschränkt. Da es aber eine zerstörungsfreie Technik ist, kann die Probennahme unter Einsatz einer anderen Faserkombination wiederholt werden. In der folgenden tabellarischen Übersicht werden die Aufbereitungsmethoden vergleichend zusammengefasst:

Tab. 2: Vergleich der Probenaufbereitungs-Verfahren

Aufbereitungsmethode	Stärken/Vorteile	Schwächen/Nachteile
Destillation	Physikalische Trennmethode, ergibt möglicherweise eine sichtbare Probe, geeignet für polare, mit Wasser mischbare Stoffe	Zeitaufwändig, hoher apparativer Aufwand, keine Abtrennung hoch siedender Komponenten, teilweise destruktiv, geringe Empfindlichkeit, hohes Kontaminationspotential
Extraktion	Beste Methode für höher siedende Substanzen, alle Komponenten, polare und unpolare, lassen sich abtrennen	Starke Matrixeffekte, dadurch hohes Kontaminationspotenzial, geringe Empfindlichkeit durch hohen Lösemitelanteil, teilweise destruktiv
Direkte Headspace	Im Vergleich schnellste und einfachste Methode, geeignet für sehr leicht flüchtige Komponenten, geringste Kontaminationsgefahr	geringe Empfindlichkeit, leicht flüchtige Komponenten stark bevorteilt
Dynamische Headspace mit Aktivkohle und Lösungsmitteldesorption	Effektive Trennmethode, weniger destruktiv	Apparativer Aufwand, Vakuumpumpe oder Trägergas, nicht wiederholbar, wenig geeignet für polare oder wassermischbare Verbindungen, Lösungsmittel CS ₂ Konzentrationminderung durch Extraktion

Aufbereitungsmethode	Stärken/Vorteile	Schwächen/Nachteile
Dynamische Headspace mit Tenax und Thermodesorption	Schnelle und effektive Methode, für polare und unpolare Verbindungen anwendbar, Trennschritt wiederholbar, Bestimmung lässt sich automatisieren, Thermodesorption, keine Konzentrationsminderung	Weniger effektiv für leichter siedende Komponenten, analytische Bestimmung nicht wiederholbar
Statische Headspace mit Aktivkohle und Lösungsmitteldesorption „Carbon-strip-Methode“	Saubere und leicht durchzuführende Methode, effizient für Kohlenwasserstoffe, carbon-strip lässt sich teilen, geringe Kontamination	Wenig geeignet für polare oder wasser-mischbare Verbindungen, lange Adsorptionszeiten, Desorption mit CS ₂ (s. dynamische Headspace)
Statische Headspace Festphasen-Mikro-Extraktion – SPME	Schnelle und am einfachsten durchzuführende Methode, durch Faserauswahl für alle Brandlegungsmittel anwendbar, leicht zu standardisieren, geringe Kontaminationsgefahr	Spezielles Halter-System erforderlich, Fasern haben nur begrenzte Wiederverwendbarkeit, mechanische Stabilität gering

In der nachfolgenden Abbildung 5 sind die Gaschromatogramme einer mit verschiedenen Methoden aufbereiteten, gleichteiligen Mischung aus Ottokraftstoff (OK) und Diesellokraftstoff (DK) gegenübergestellt. Dies sind im Einzelnen:

a – Extraktion mit n-Hexan (Ausgangsmischung)

Die leichtflüchtigen und auch die schwerer flüchtigen Komponenten des Diesels werden im GC vollständig erfasst; durch das Extraktionsmittel (n-Hexan) ist der vordere Bereich überlaufen.

b – Headspace bei Zimmertemperatur

Im GC sind die leichtflüchtigen Verbindungen bis zum Toluol erkennbar. Die schwerer flüchtigen Kohlenwasserstoffe und die Bestandteile des Diesels werden nur noch geringfügig bzw. gar nicht erfasst.

c – SPME (PDMS-Faser) bei Zimmertemperatur

Im GC werden die leichtflüchtigen Kohlenwasserstoffe nur schwach, die aromatischen und die höher siedenden Bestandteile bis etwa C₁₅ stärker wiedergegeben. Die höheren Diesellokomponenten werden nicht mehr erfasst.

d – SPME (PDMS-Faser) bei 60 °C

Das GC entspricht im vorderen Bereich etwa dem von c; es sind aber mehr schwerer flüchtige Komponenten in höherer Konzentration enthalten.

e – Carbon-strip-methode (DEFLEX – s. S.417)

Leichter und schwerer flüchtige Komponenten bis etwa C_{20} werden gleich gut erfasst. Der tiefsiedende Bereich wird z. T. durch CS_2 überlagert, die hoch siedenden Dieselkomponenten sind nicht mehr enthalten.

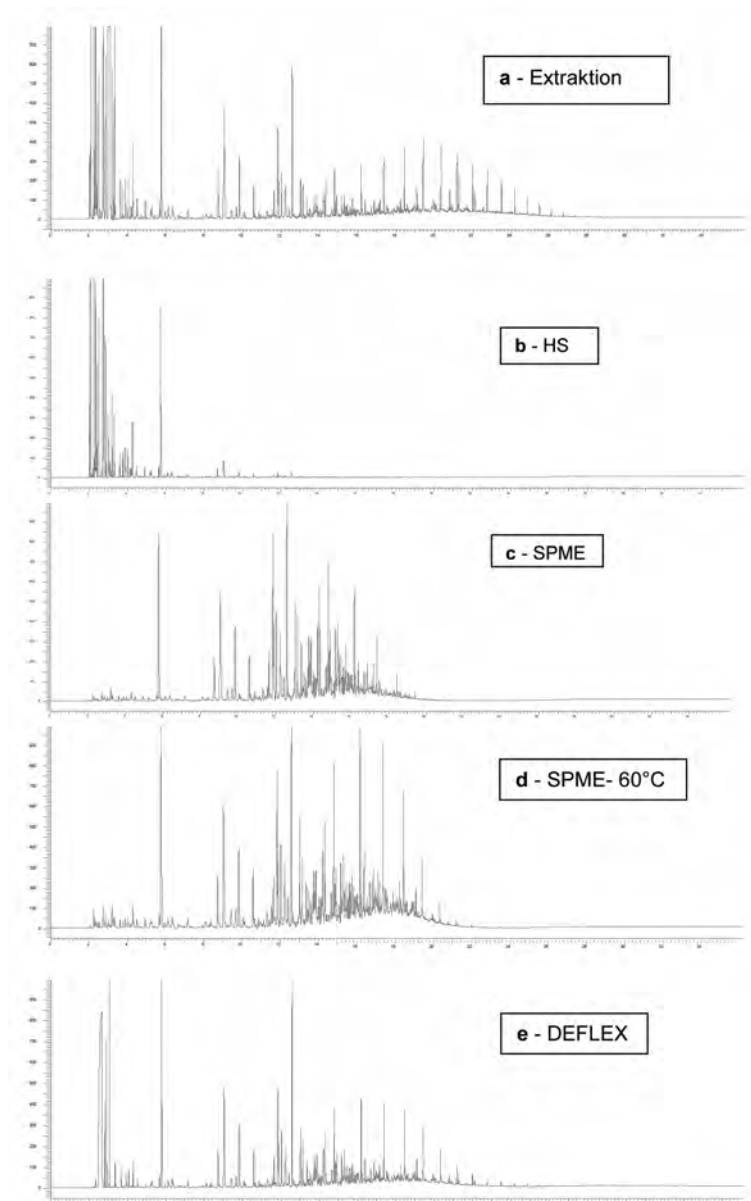


Abb. 5: Chromatogramme von OK/DK nach verschiedenen Aufbereitungsmethoden

Alle in der Probenaufbereitung angewandten Methoden haben Vorteile, aber auch methodenspezifische Nachteile. Eine ideale Methode gibt es nicht. In einem brandanalytisch ausgerichteten Labor sollten daher mehrere, für die jeweilige analytische Aufgabenstellung geeignete und nach den eigenen Möglichkeiten am besten durchzuführende Aufbereitungsverfahren ausgewählt und standardisiert werden.

Verfahrensanweisungen nach ASTM-Standard:

Die American Society for Testing and Materials (*ASTM*) ist eine wissenschaftlich-technische Vereinigung, von deren Mitgliedern seit 1990 Standard-Methoden und Standard-Arbeitsanweisungen, auch auf forensisch analytischem Gebiet, entwickelt und herausgegeben werden. Für die Probenaufbereitung zur Analytik brennbarer Flüssigkeiten bei der Brandursachenuntersuchung sind folgende sechs neuere ASTM-Standardvorschriften herausgegeben worden:

ASTM E 1385 – 00 Standard Practice for Separation and Concentration of Ignitable Liquid Residues from Fire Debris Samples by Steam Distillation

ASTM E 1386 – 00 Standard Practice for Separation and Concentration of Ignitable Liquid Residues from Fire Debris Samples by Solvent Extraction

ASTM E 1388 – 00 Standard Practice for Sampling of Headspace Vapors from Fire Debris Samples

ASTM E 1412 – 00 Standard Practice for Separation and Concentration of Ignitable Liquid Residues from Fire Debris Samples by Passive Headspace Concentration with Activated Charcoal

ASTM E 1413 – 00 Standard Practice for Separation and Concentration of Ignitable Liquid Residues from Fire Debris Samples by Dynamic Headspace Concentration

ASTM E 2154 – 01 Standard Practice for Separation and Concentration of Ignitable Liquid Residues from Fire Debris Samples with Solid Phase Microextraction (*SPME*)

(Alle Vorschriften aus: *ASTM Annual Book of Standards*, Vol. 14.02, 2002)

Die Anwendung der Standardanweisungen wird für Laboratorien empfohlen und erfolgt auf freiwilliger Basis. Auf die Erfordernisse der Qualitätssicherung wird in Kapitel 8 eingegangen.

5.3.1.2 Gaschromatographie (GC)

Historisch betrachtet sind bei der analytischen Untersuchung von Brandrückständen zum Nachweis brandfördernder Substanzen verschiedene spektrometrische und chromatographische Analysemethoden eingesetzt worden. Da aber zur Zündung und zur Beschleunigung von Bränden im überwiegenden Maße brennbare Flüssigkeiten zum Einsatz kommen (s. Kapitel 5.2) und analytisch bestimmt werden sollen, hat sich die Gaschromatographie (*GC*) als die fast ausschließlich angewendete Analysemethode

durchgesetzt. Es ist ein Trennverfahren, bei dem gasförmige oder in die Gasphase überführbare Stoffe bzw. Stoffgemische in Einzelverbindungen aufgetrennt werden. Durch ein angeschlossenes Detektorsystem können die Mengen der getrennten Komponenten als relative und auch quantitative Intensitäten angezeigt werden.

Die Auftrennung eines Stoffgemisches erfolgt durch Verteilung der Einzelverbindungen zwischen einem Trägergas, der *mobilen Phase*, und einem speziellen Material, der *stationären Phase*, die sich in einer (Trenn-) Säule befindet. Bei der hier beschriebenen, für die Analyse organischer Verbindungen dominierenden *Gas-Flüssigkeits-Chromatographie* („*Verteilungschromatographie*“) ist die stationäre Phase ein Flüssigkeitsfilm.

Die Menge der aufgetrennten Einzelkomponenten wird am Säulenanfang als relative Intensität von einem Detektorsystem gemessen. Die Detektionsintensitäten werden in Abhängigkeit von der jeweiligen *Retentionszeit* graphisch dargestellt. Als Retentionszeit wird die Zeit bezeichnet, die eine Komponente zum Durchlaufen der Trennsäule benötigt. Das registrierte Intensitäts-Zeit-Diagramm wird als *Gaschromatogramm*; die im Chromatogramm enthaltenen Signale werden als *Peaks* bezeichnet.

Ein GC-System besteht aus der *Gasversorgung*, der *Probenaufgabe*, einem (Säulen-) *Ofen*, einer (Trenn-) *Säule* und einem *Detektor* sowie einem Datenerfassungssystem, das den Messvorgang steuert und die Messdaten aufzeichnet. Aus diesen Grundbausteinen und entsprechend dem in der folgenden Abbildung dargestellten schematischen Aufbau lässt sich auch das Funktionsprinzip eines GC-Systems erkennen.

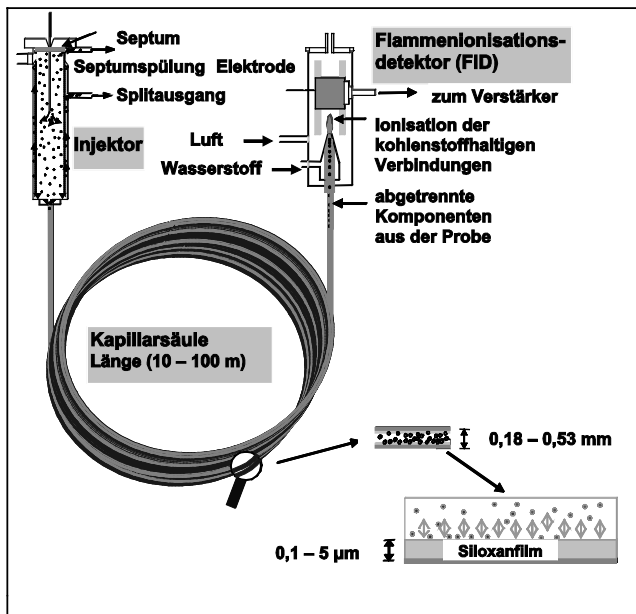


Abb. 6: Schematischer Aufbau eines Kapillar-GC-Systems

Die Gasversorgung liefert ein inertes Trägergas. Geeignet sind Helium, Stickstoff und Wasserstoff. Sie können zum Materialtransport und auch als mobile Phase dienen. Über das Probenaufgabesystem, dem *Injektor*, wird eine Analysenprobe aufgegeben und mit dem Trägergas auf die Trennsäule transportiert. Der Injektor ist heizbar und mit einem Silikongummi, dem *Septum*, abgedichtet. Gasförmige und auch flüssige Proben werden zur Analyse durch das Septum mit einer Injektionspritze in den Trägergasstrom eingespritzt. Der am häufigsten verwendete Injektor ist der *Split-/Splitless-Injektor*, in dem eine Teilung des Trägergasstromes und der verdampften Probe möglich ist, so dass die Trennsäule nicht überladen wird. Bei Spurenanalysen kann durch Schließen des Splitausgangs eine vollkommen splitlose Aufgabe durchgeführt werden, wodurch die gesamte Probe auf die Säule gelangt. Mit automatischen Probengebervorrichtungen ist eine besonders genaue und reproduzierbare Probeninjektion möglich.

Trennsäulen können aus Edelstahl-, Glas- oder hochreinen Quarz-Rohren (*fused silica*) gefertigt werden. In der GC-Analytik werden überwiegend Kapillarsäulen aus feinen Quarz-Rohren (*fused silica columns*) mit Innendurchmessern 0,18 mm bis 0,5 mm und Längen von 10 m bis 100 m verwendet. Die stationäre Trennphase wird als Flüssigkeitsfilm mit Schichtdicken zwischen 0,1 μm und 5 μm oder als Flüssigkeitsschicht in einer porösen Trägerschicht von etwa 30 μm auf die innere Wandung der Quarzkapillare aufgebracht. Das Trennprinzip ist die Verteilung der Stoffe zwischen dieser stationären flüssigen und der mobilen gasförmigen Phase. Die Trennwirkung einer Säule ist abhängig von der individuellen Affinität des Analyten zum verwendeten Trägermaterial und von den jeweiligen GC-Konditionen, wie Art, Druck und Fließgeschwindigkeit des Trägergases sowie Höhe und Verlauf der Temperatur. Da Brandlegungsmittel meist unpolar sind, werden vor allem Kapillarsäulen mit unpolaren oder wenig polaren Trennphasenmaterialien verwendet.

Über den Ofen werden Trägergas und Trennsäule, nach einem Temperaturprogramm aufgeheizt. Unpolare zu trennende Komponenten werden dadurch nach ihren Siedepunkten in der Säule aufgetrennt. Bei polaren Verbindungen erfolgt die Auftrennung nach Polarität und Siedepunkt. So erreichen die aufgetrennten Komponenten nacheinander den Detektor, wo sie mit einer von den Detektor- und den Substanzeigenschaften, aber auch von der Menge abhängigen Intensität angezeigt werden.

Die in der GC-Brandanalytik gebräuchlichsten Detektoren sind der Flammenionisationsdetektor (*FID*) und der Massenselektive-Detektor (*MSD* bzw. *MS*).

Beim FID beruht das Detektionssignal auf der Ionenbildung durch die Verbrennung von Verbindungen mit C–C- und/oder C–H-Bindungen in einer reinen Wasserstoff-Flamme. Der Ionenstrom wird über eine Sammelelektrode verstärkt, die Spannungsdifferenz zur reinen Wasserstoff-Flamme gemessen und das Messsignal registriert. Der FID zeichnet sich durch eine sehr niedrige Nachweisgrenze und einen großen linear verlaufenden Anzeigebereich aus. Zum Betreiben eines FID ist Wasserstoff als Brenngas (*Detektorgas*) und Sauerstoff oder gereinigte Luft erforderlich.

Die folgende Abbildung zeigt ein GC-System mit Autosamplereinrichtung. Über den Autosampler können die vorbereiteten Proben automatisch und rechnergesteuert eingespritzt und vermessen werden.



Abb. 7: Gaschromatograph mit Autosampler

Beispiel für Konditionen einer gaschromatographischen Messung
(Ottokraftstoff und Dieselmkraftstoff)

GC-Systeme: *Hewlett Packard* HP 6890 oder *Perkin Elmer* PE-GC Autosystem XL

Säulen: *unpolar* – Länge 50 m; 0,32 μm ID; Filmdicke 0,1 μm bzw.

leicht polar (5 %) – Länge 60 m; 0,22 μm ID; Filmdicke 0,25 μm

Trärgas: Helium, 140 kPa bzw. 330 kPa (ca. 2 – 4 ml min^{-1})

Injektor: Split/Splitless

Temperatur: 250 $^{\circ}\text{C}$

Splitrate: 30 ml min^{-1} (Δ 1 : 8)

Probe: 1 μl Flüssiginjektion (Autosampler)

Detektor: FID – Temperatur: 330 $^{\circ}\text{C}$

Temperaturprogramm:

Starttemperatur: 40 $^{\circ}\text{C}$ (2 min. halten)

Ramp 1: 70 $^{\circ}\text{C}$ mit 4 K min^{-1}

Ramp 2: 320 $^{\circ}\text{C}$ mit 15 K min^{-1} (10 min halten)

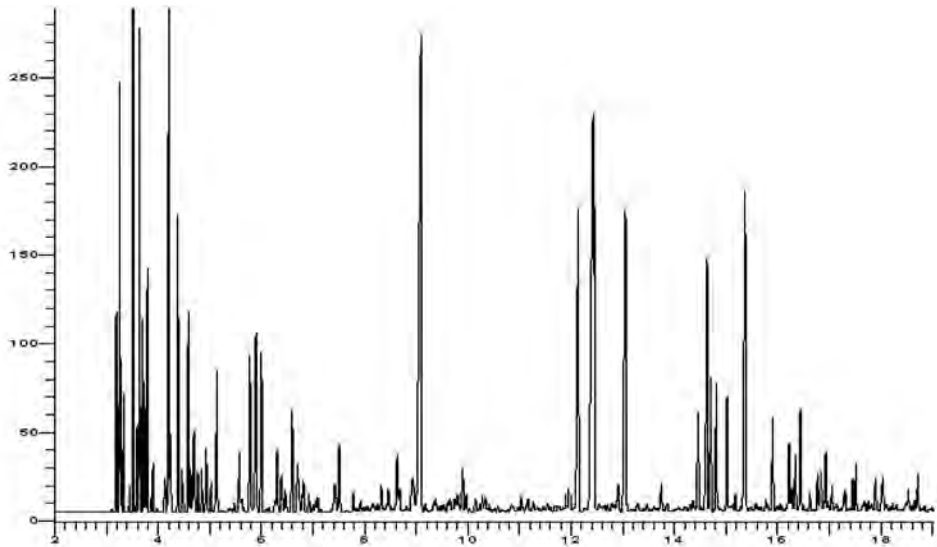


Abb. 8: Gaschromatogramm eines Ottokraftstoffes

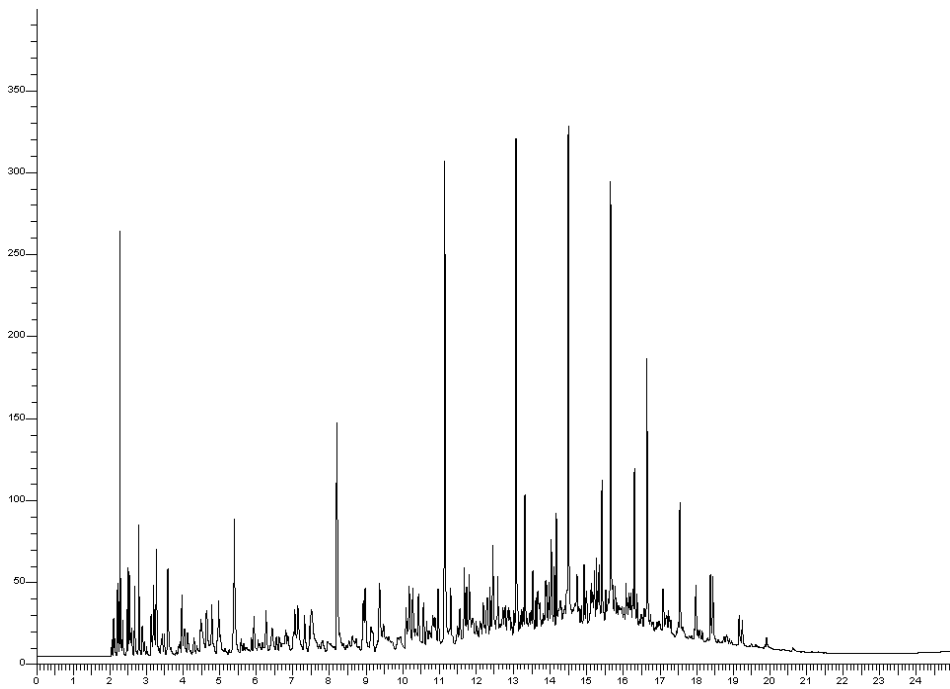


Abb. 9: Gaschromatogramm eines Dieselkraftstoffs

Eine Identifizierung der aufgetrennten Einzelverbindungen direkt aus einem *Gaschromatogramm* ist nicht möglich. Die handelsüblichen bekannten Kohlenwasserstoffgemische, wie Ottokraftstoff oder Diesellochstoff, sind, bei ausreichender Nachweismenge, aber schon über ihre charakteristischen Komponentenverhältnisse, den *GC-Peak-Sequenzen* bzw. *GC-Peak-Mustern* in den Chromatogrammen zu erkennen. Diese oder auch unbekannte Verbindungen können unter Verwendung von Vergleichssubstanzen nach ihren Retentionszeiten zugeordnet, aber nicht sicher identifiziert werden. Eine sicherere, direkte Identifizierung ist bei Einsatz der Gaschromatograph-Massenspektrometer-Kopplung möglich, bei der ein Massenspektrometer als Detektor verwendet wird.

5.3.1.3 Gaschromatographie-Massenspektrometrie

Die Identifizierung unbekannter oder in einer komplexen Matrix nur sehr gering konzentrierter Verbindungen ist allein mit den Methoden der Gaschromatographie mit großer Unsicherheit oder gar nicht möglich. Die Gaschromatograph-Massenspektrometer-Kopplung (*GC-MS-Kopplung*) mit der Möglichkeit zur Komponentenidentifizierung ist deshalb auch in der Brandlegungsmittelanalytik die Standard-Untersuchungsmethode geworden. Begünstigend dabei hat sich die Entwicklung kleinerer, aber dennoch sehr leistungsfähiger Massenspektrometer, sog. *bench-top* Modelle ausgewirkt, die aufgrund ihrer Funktion auch als Massenselektiver-Detektor (*MSD*) bezeichnet werden. Im Massenspektrometer werden die gaschromatographisch aufgetrennten Probenbestandteile ionisiert und fragmentiert. Die entstandenen Fragmente (*Anionen, Kationen, Radikale*) werden im Hochvakuum nach ihrer *Massenzahl*, genauer nach dem Verhältnis der Masse (*m*) zur Ladungszahl (*e*), getrennt.

Massenspektrometer bestehen aus einem *Proben-Einlass-System*, einer *Ionenquelle* zur Erzeugung geladener Teilchen und einem Trenn- oder Analysatorsystem (*Massenanalysator*) zur Auftrennung der Ionenmassen sowie einem Detektor, der mit einer Registrier- und Auswerteeinheit (*Computer*) verbunden ist. Nach der Art der Ionentrennung bzw. Ionenfilterung werden u. a. unterschieden: Magnetfeld- und Sektorfeld-Massenspektrometer, Quadrupol-Massenspektrometer und Massenspektrometer mit Ionenfalle (*Ion Trap MS*). Die Auftrennung der Ionenmassen erfolgt im Quadrupolmassenfilter und in der Ionenfalle grundsätzlich nach vergleichbaren physikalischen Prinzipien. Im Unterschied dazu werden im Ion-Trap-MS die Ionen in einem dreidimensionalen Elektrodenraum, der Ionenfalle, für einige Zeit eingeschlossen, durch Variation der anliegenden Wechselspannung ausgeschleust und zum Detektor geleitet. Ion-Trap-MS sind wenig anfällig und kostengünstiger als Quadrupol-MS, verfügen aber über eine etwas geringere Massenauflösung und über einen kleineren Leistungsbereich. Am weitesten verbreitet, auch in brandanalytisch arbeitenden Laboratorien, sind aber GC-MS-Systeme mit Quadrupol-Massenfilter, deren Funktionsweise im Folgenden dargestellt wird.

In der Ionenquelle des MS erfolgen die Ionisierung und die Fragmentierung der einzelnen gaschromatographisch aufgetrennten Komponenten. Die dazu verwendbaren Ionisierungsmethoden sind die *Chemische Ionisation (CI)* und die *Elektronen-Ionisation (EI)*, auch mit *Elektronenstoß-Ionisation* bezeichnet). Bei der *CI* werden Ionen eines *Reaktionsgases* (*Methan, Ammoniak, Isobutan* u. a.) zur Probenionisation benutzt. Bei der meist eingesetzten *EI* wird durch Wechselwirkung der Probenmoleküle mit hochenerge-

tischen Elektronen eine Aufspaltung in charakteristische Molekülbruchstücke („*Fragmente*“) und die Bildung von Ionen erreicht.



Die Fragmentierung ist abhängig von der Struktur einer Verbindung und erfolgt nach bestimmten energetischen und strukturellen Gesetzmäßigkeiten. Sie ist für diese Verbindung charakteristisch und kann daher zur Identifizierung und zur Strukturaufklärung herangezogen werden.

Im Trennsystem, dem *Massenanalysator*, werden die Ionen entsprechend ihrem *Masse-Ladungs-Verhältnis* (m/e) in einem Magnetfeld aufgetrennt und beschleunigt. In den Quadrupol-Massenspektrometern besteht dieses Analysatorsystem aus vier diagonal angeordneten Magneten (vergoldete Quarzstäbe), an die paarweise diagonal eine negative und eine positive Gleichspannung angelegt und mit einer hochfrequenten Spannung überlagert wird.

Im Detektor des MS-Systems, meistens einem *Sekundär-Elektronen-Vervielfacher* (*SEV*), wird der Ionenstrom der Fragmente in ein Mess-Signal umgewandelt. Die Aufzeichnung und die Spektrendarstellung der Summe aller Ionenströme werden in Abhängigkeit von der Retentionszeit als Totalionenchromatogramm (*TIC*) bezeichnet. Das TIC einer MS-Messung kann mit dem Gaschromatogramm einer GC-FID Messung verglichen werden, wobei aber Unterschiede in der Intensitätsverteilung einzelner Komponenten auftreten können. Für die einzelnen Peaks des TIC werden im sog. genannten *Full-scan-Modus* über einen bestimmten, zuvor festgelegten Massenbereich, z. B. von 32 m/e bis 300 m/e , die vollständigen Massenspektren aufgezeichnet. Im Massenspektrum einer einzelnen Verbindung wird die prozentuale Intensität (*relative Häufigkeit*) als Funktion des Masse/Ladungsverhältnisses dargestellt. Den größten Peak bezeichnet man als Basispeak und setzt ihn auf 100 % Intensität. Alle anderen Peaks werden dazu normiert. Um vergleichbare und weitgehend geräteunabhängige Massenspektren zu erhalten, wird z. B. zur Erzeugung („*Emission*“) der Elektronen bei einer Energie von 70 eV gemessen. Die weiteren Konditionen, wie Scan-Dauer (*scan time*), Massen-Messbereich und Aufnahmebedingungen hängen vom Gerätetyp und der analytischen Aufgabenstellung ab.

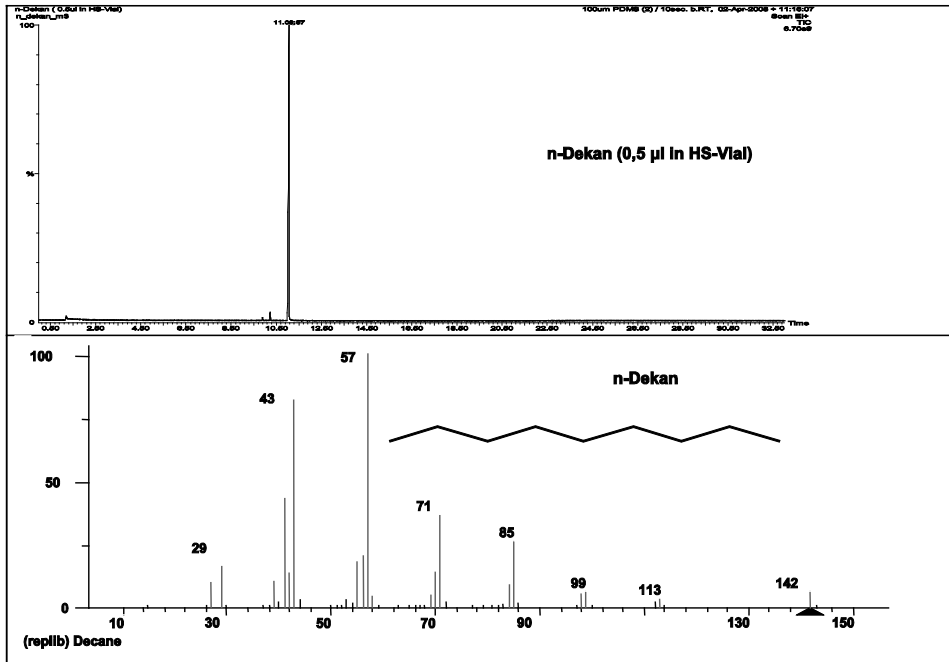


Abb. 10: TIC und Massenspektrum von n-Dekan (C₁₀)

Die Identifizierung von einzelnen Substanzbestandteilen erfolgt auf empirische Weise durch Vergleich mit Spektren-Datenbanken. Eine vollständige Übereinstimmung wird bei Verwendung externer Datenbanken mit Massenspektren von Referenzverbindungen nicht erzielt. Bei der Spektrenauswertung wird deshalb immer der prozentuale Grad der Übereinstimmung zwischen Probe- und Vergleichsverbindung angegeben. Dieser steigt mit der Anzahl der relevanten vergleichbaren Ionenmassen in den Massenspektren an.

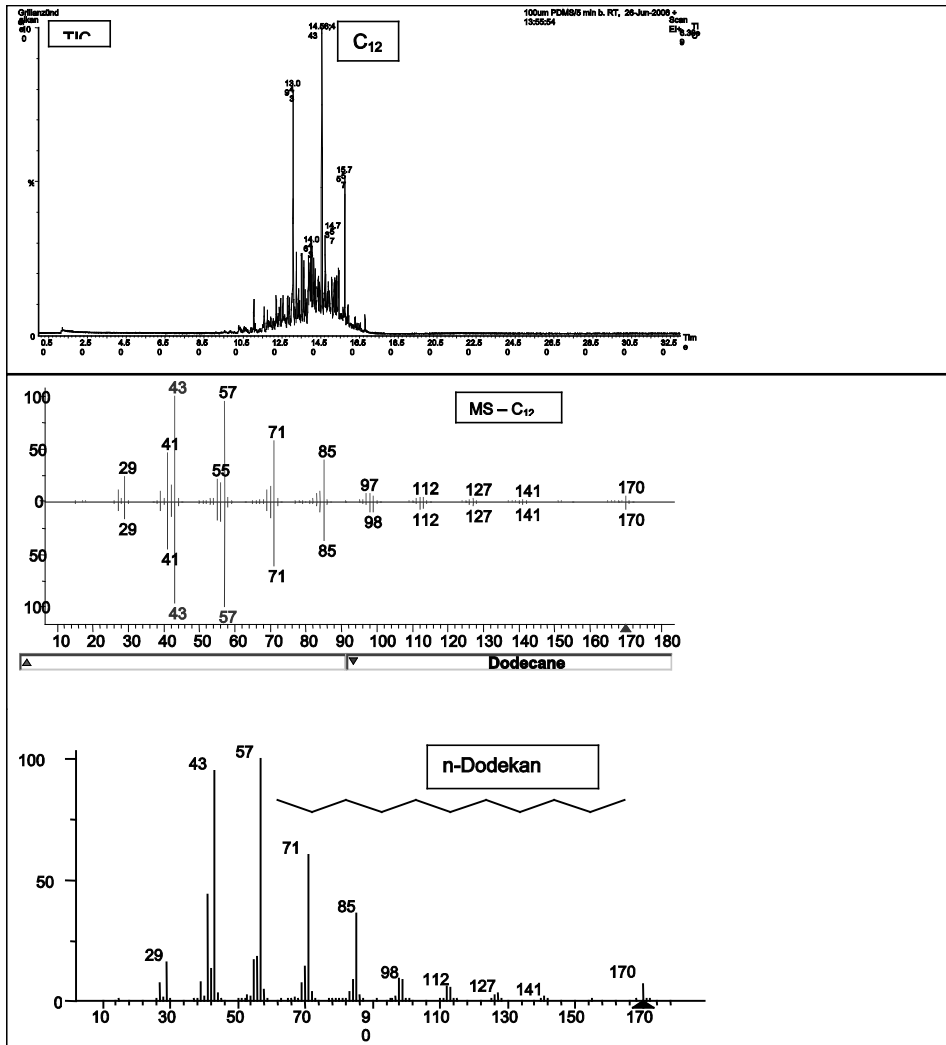


Abb. 11: TIC eines Petroleums: MS von C_{12} , Bibliotheksvergleich und Bibliotheksvorschlag n-Dodekan

Bei komplexen Massenspektren mit starkem Untergrundrauschen oder mehreren nicht direkt zuzuordnenden Signalen kann aus dem *Full-scan*-Modus eine Massenfilterung nach bestimmten charakteristischen Fragment-Ionen durchgeführt werden; so z. B. für bestimmte Verbindungsklassen, die für brennbare Flüssigkeiten, wie n-Alkane oder Alkyl-substituierte Aromaten, charakteristisch sind. Diese massenspektrometrische Auswertungsmethode führt zu einer deutlichen Datenreduzierung störender und zu einer Fokussierung auf die nachzuweisenden Verbindungen. Diese Methode wird in den englischsprachigen Bereichen als *EIP (Extracted Ion Profiling)*, die Massenspektren werden

als *EIC* (*Extracted Ion Chromatogram*) bzw. als *RIC* (*Reconstructed Ion Chromatogram*) bezeichnet (s. Kapitel 5.3.1.4).

Eine Erweiterung bzw. Ergänzung der Identifizierungsmöglichkeiten brennbarer Flüssigkeitsgemische bietet auch die so genannte *Target Compound Chromatography (TCC)*. Dabei werden bestimmte, ein Flüssigkeitsgemisch charakterisierende Zielverbindungen (*target compounds*) ausgewählt. Aus dem massenspektrometrisch erstellten TIC wird mit einem speziellen Daten-Analyse-Programm bei der jeweiligen Retentionszeit die Zielverbindung über 2 bis 3 charakteristische Fragment-Ionen identifiziert und ihre relative Intensität halbquantitativ als Funktion der Retentionszeit dargestellt.

Zur Auswertung werden Target-Compound-Chromatogramme unbekannter Proben mit denen in gleicher Weise aus Referenzverbindungen erstellten verglichen (s. Kapitel 5.3.1.4).

Das EIP ist nicht gleichbedeutend mit der Methode der *selektiven Ionendetektion (SID)*, bei der statt eines kompletten Massenspektrums nur der Ionenstrom für wenige, ausgewählte Massenzahlen detektiert und aufgezeichnet wird. Für diesen speziellen Detektionsmodus gibt es folgende Bezeichnungen: Single Ion Monitoring oder Selected Ion Monitoring (*SIM*), Selected Ion Detection (*SID*) bzw. Selected Ion Recording (*SIR*) oder Selected Ion Current (*SIC*). Der Vorteil dieser Arbeitsweise liegt in der längeren Messzeit für ein ausgewähltes Ion, wodurch Nachweis- und Bestimmungsgrenzen deutlich verringert werden können. Die SID wird daher vor allem in der Spurenanalyse bekannter Verbindungen und zu quantitativen Bestimmungen verwendet. Zur Identifizierung unbekannter Verbindungen ist diese Verfahrensweise nicht oder nur sehr bedingt anwendbar, da keine vollständigen Massenspektren einer Verbindung erzeugt werden.

ASTM – Standards

Auch für die gaschromatographische und die gaschromatographisch-massenspektrometrische Untersuchung von Brandlegungsmitteln gibt es jeweils eine Standard-Testmethode:

ASTM E 1387 – 01 Standard Test Method for Ignitable Liquid Residues in Extracts from Fire Debris Samples by Gas Chromatography

ASTM E 1618 – 01 Standard Test Method for Ignitable Liquid Residues in Extracts from Fire Debris Samples by Gas Chromatography-Mass Spectrometry

5.3.1.4 Auswertungen

Ziel von GC- und GC-MS-Untersuchungen in der Brandanalytik ist der sichere Nachweis einer brennbaren Flüssigkeit. Eine reine Verbindung, wie z. B. Ethanol, Aceton oder Benzol, ergibt im Gaschromatogramm nur einen *Peak* und kann mittels einer Vergleichsmessung dieser Verbindung nur mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit zugeordnet werden. Eine Identifizierung ist über das Massenspektrum der GC-MS-Untersuchung durch den Spektrenvergleich mit einer Spektrendatenbank (*Bibliotheks-*

che) auch nur mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit möglich, die von der Spektrenvielfalt abhängt. Wenn das Massenspektrum nur wenige oder nur relativ unspezifische Masse-Ionen enthält (z. B. Paraffin-Kohlenwasserstoffe), ist auch die massenspektrometrische Zuordnung mit einer mehr oder weniger hohen Unsicherheit behaftet.

Bei den am häufigsten verwendeten brennbaren Flüssigkeiten handelt es sich überwiegend um Flüssigkeitsmischungen (s. Kapitel 5.2), die aus zahlreichen, teilweise weit über 100 Einzelverbindungen bestehen. Die bei der Untersuchung erzeugten Chromatogramme enthalten eine Vielzahl von *Peaks*, deren Anzahl durch Rauschen, Matrix- und Pyrolyseverbindungen erhöht wird. Eine Bestimmung von Komponenten brennbarer Flüssigkeiten durch Massenspektrenvergleich mit Bibliotheksspektren ist deshalb häufig nicht ausreichend für eine sichere Identifizierung. Zur Auswertung solcher Chromatogramme und zur Zuordnung von *Einzel*-Komponenten eines bestimmten Flüssigkeitsgemisches können die *Peak-Muster-Erkennung (pattern recognition)*, das *Extracted Ion Profiling (EIP)* und die *Target Compound Chromatography (TCC)* angewendet werden.

Bei der Peak-Muster-Erkennung werden die Retentionszeit-Abfolge und die relativen Intensitäten der Peaks in FID-Gaschromatogrammen oder in den Total-Ionen-Chromatogrammen einer GC-MS-Untersuchung durch visuellen Vergleich mit unter gleichen Konditionen aufgenommenen Chromatogrammen von Vergleichssubstanzen ausgewertet. Beispiele für derartige Peak-Muster sind in Chromatogrammen von Dieselmotorkraftstoff oder Heizöl EL die Doppelpeaks der iso-Alkane (*biogene Marker*) *Pristan* (C₁₉) und *Phytan* (C₂₀) mit den unverzweigten C₁₇- und C₁₈-Kohlenwasserstoffen bzw. in Chromatogrammen von Ottokraftstoff oder einigen speziellen Lösungsmitteln die Peaks der zwei- und dreifach Alkyl-substituierten Benzolverbindungen

Die nachfolgende Abbildung eines Ottokraftstoffchromatogramms zeigt die Peak-Sequenzen dieser C₂- und C₃- Alkyl-substituierten aromatischen Kohlenwasserstoffe:

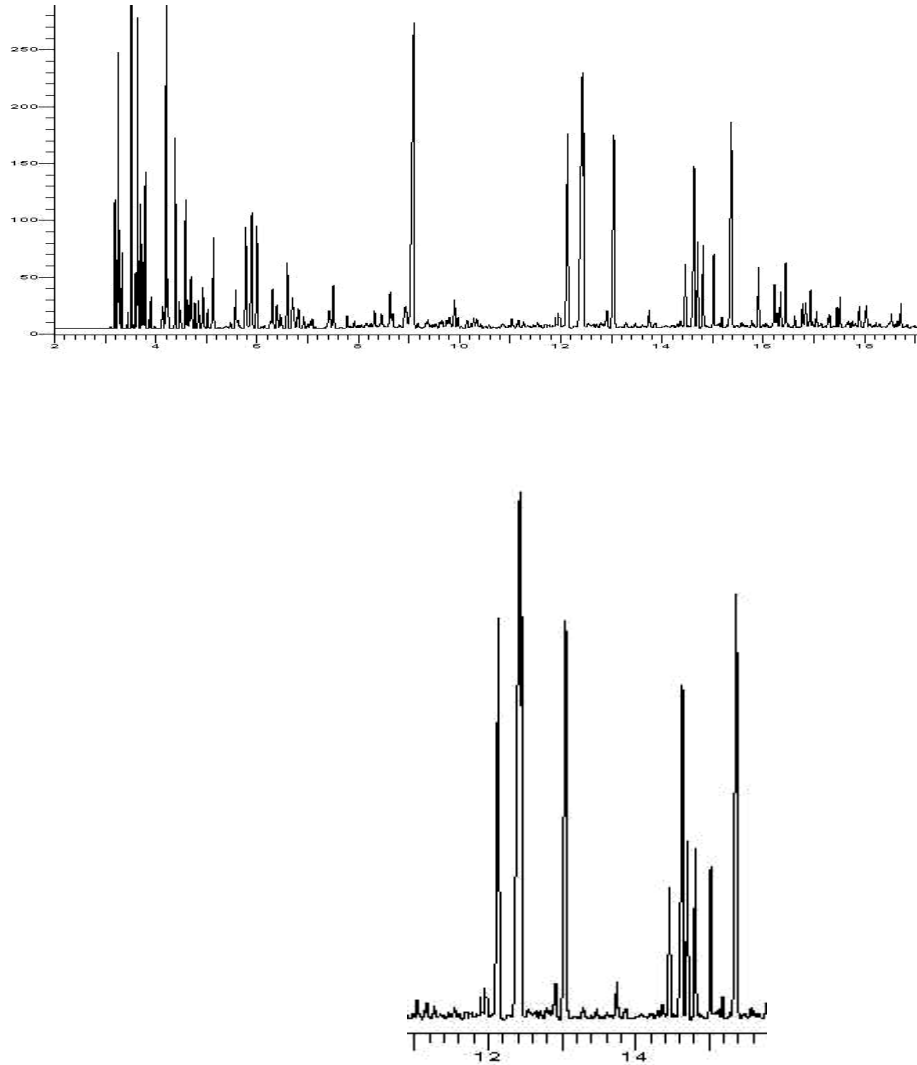


Abb. 12: Charakteristische Peak-Sequenzen: C₂- und C₃- Alkyl-substituierte Aromaten

Die Möglichkeiten der Peakmuster-Erkennung und des Peakmuster-Vergleichs werden durch die Anwendung die Technik des EIP ergänzt und verbessert. Beim EIP werden aus dem Full-Scan-Massenspektrum einzelne stoffgruppenspezifische Fragmentationen, die für eine Verbindungsklasse, z. B. Alkane oder Alkylbenzole im Ottokraftstoff, charakteristisch sind, herausgefiltert und ihre jeweiligen Intensitäten zu einem Profil aufsummiert.

Tab. 3: Haupt-Fragmentionen einiger Verbindungsklassen brennbarer Flüssigkeiten

Verbindungs-klasse	Fragmentionen m/e
Alkane (Paraffin-Kohlenwasserstoffe)	43, 57, 71, 85 (+14)
Cycloalkane und Alkene	55, 69, 83 (+14)
Alkyl-Benzole (Einfache Aromaten)	91, 105 (106), 119, 133
Naphthaline (Mehrkernige Aromaten)	128, 142, 156
Indane	117, 118, 131, 132
Monoterpene	93, 136
Styrole, Alkylstyrole (Pyrolyseprodukte)	104, 117, 118, 132, 146
Alkohole	31, 45
Ketone	43, 58, 72, 86

Die Intensitäten der aufsummierten Ionenprofile werden in Abhängigkeit von ihrer Retentionszeit dargestellt. Verwendet werden so genannte Haptionen: struktursignifikante Ionen und Molekülionen der jeweiligen Verbindungsklasse (s. obige Tabelle). Durch die EIP werden Komponenten aus dem gesamten Chromatogramm entfernt, die diese Ionen nicht enthalten. Dadurch ergibt sich eine deutlich besser auf die charakteristischen Flüssigkeitskomponenten ausgerichtete (fokussierte) Darstellung. Ein EIP für die Alkylaromaten im Ottokraftstoff wird in der nachfolgenden Abbildung gezeigt. Dazu wurden die Fragmentionen-Chromatogramme m/e 91 und 105 m/e 105 dem TIC herausgezogen, ihre Intensitäten aufsummiert und in einem „Profil“ zusammengeführt.

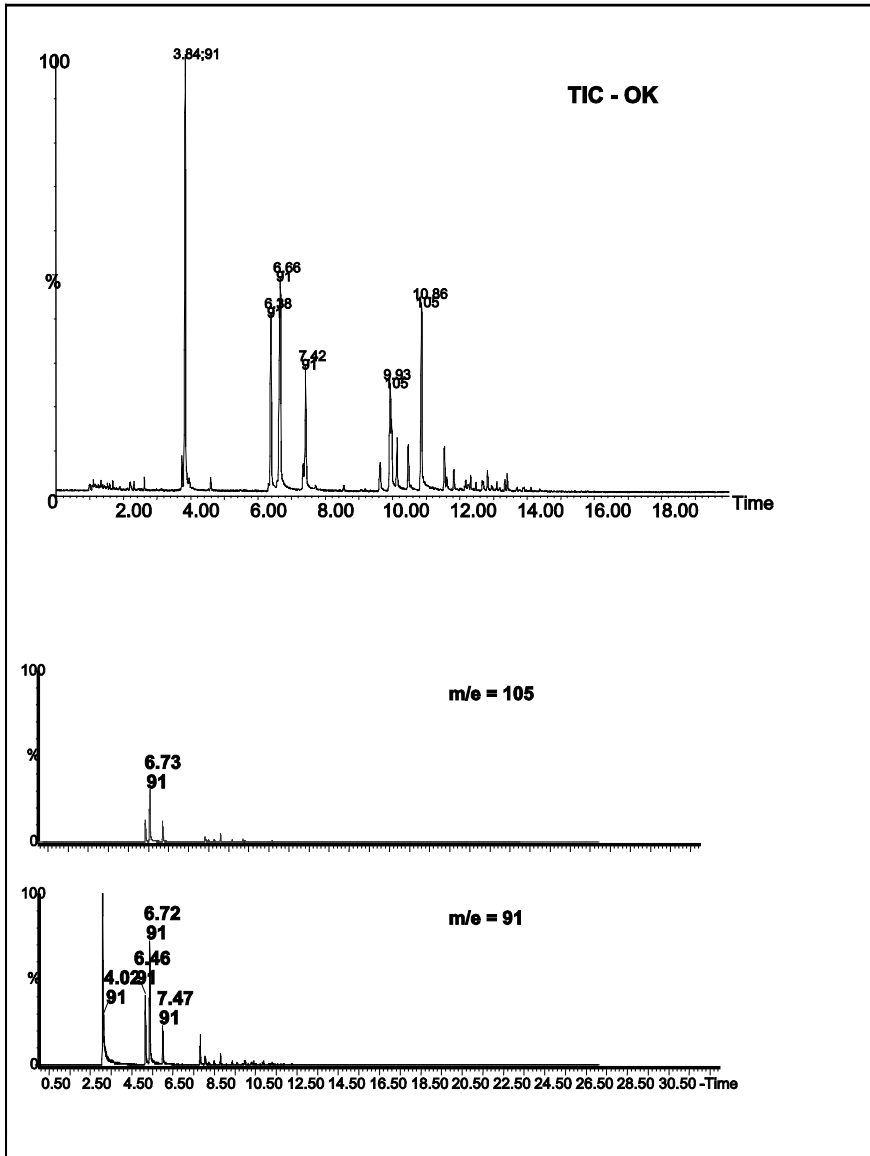


Abb. 13: Extracted Ion Profiling mit EIC der Ionenmassen 105 und 91 von aromatischen KW im OK

Die Auswertung für unbekannte Proben erfolgt durch Vergleich der Ionenprofile (Peak-Muster) mit EIP von Referenzflüssigkeiten und die zusätzliche Identifizierung der Hauptpeaks mittels Bibliotheksspektrensuche. Obwohl einige störende Peaks von Pyrolyse- und Matrix-Verbindungen nicht vollständig eliminiert werden können, ist die EIP die am häufigsten bei der Identifizierung brennbarer Flüssigkeiten eingesetzte Technik.

Die Target Compound Chromatography (TCC) ist eine relativ aufwändige, rechnergesteuerte Auswertemethode. Sie wird noch nicht oft angewendet und nur für wenige, schwer zu identifizierende Proben eingesetzt. Daher sollen nur kurz die Grundzüge des Verfahrens dargestellt werden. Einzelne ausgewählte, für die zu bestimmende Flüssigkeit charakteristische Zielverbindungen (*target compounds*), werden aus dem massenspektrometrisch erstellten TIC mit einem speziellen Daten-Analyse-Programm bei der jeweiligen Retentionszeit über 2 bis 3 charakteristische Fragmentationen identifiziert. Ihre relative Intensität wird dann halbquantitativ als Funktion der Retentionszeit dargestellt. So ergibt sich ein weitestgehend von Störsignalen befreites Chromatogramm, (das *target compound chromatogram*), in dem nur die Zielverbindungen als Einzelpeaks mit einer charakteristischen Peak-Muster-Verteilung enthalten sind. Auswertung und Identifizierung erfolgen durch visuellen oder auch rechnergestützten Peak-Muster-Vergleich von Probenmessungen und Vergleichsmessungen mit einem Referenzstandard. Die TCC-Technik wird meistens nur als weitere Methode bei sehr schwer zu identifizierenden Materialproben mit hohen Matrix- bzw. Pyrolyseprodukt-Anteilen im Bereich der analytischen Untersuchung von Ottokraftstoffen sowie mittleren und schweren Erdöldestillaten (MPD und HPD) eingesetzt.

Bestimmte Einzelverbindungen (Schlüssel- oder Zielverbindungen), die ein komplexes Flüssigkeitsgemisch eindeutig charakterisieren, kommen nicht oder nur vereinzelt vor. Die Unterscheidung von Lösungsmittelgemischen, wie Nitroverdünnung von Ottokraftstoffmaterialien, ist z. B. über die organischen Verbindungen Methyl-Tertiärbutyl-Ether (MTBE) oder Ethyl-Tertiärbutyl-Ether (ETBE) möglich. Diese beiden Verbindungen werden ausschließlich Ottokraftstoff als Oktanzahl-Verbesserer zugesetzt. Ihr MS-Nachweis ermöglicht so die sichere Unterscheidung beider Flüssigkeitsgemische. Die zweifach-, dreifach- und vierfach-substituierten Alkyl-Benzolverbindungen sind z. B. in beiden Flüssigkeiten in vergleichbaren Konzentrationen enthalten, so dass hier eine Unterscheidung über den Peak-Muster-Vergleich oder das EIP nicht möglich ist.

Die Verbindung Ethyl-Hexyl-Nitrat (EHN) kann als Cetanzahl-Verbesserer dem Dieselloststoff zugesetzt werden und ermöglicht so eine Unterscheidung zum gleichartig zusammengesetzten Heizöl EL, wenn sie mit der GC-MS nachgewiesen wird. In diesen beiden Fällen können diese organischen Einzelverbindungen als eindeutige Zielverbindungen angesehen werden.

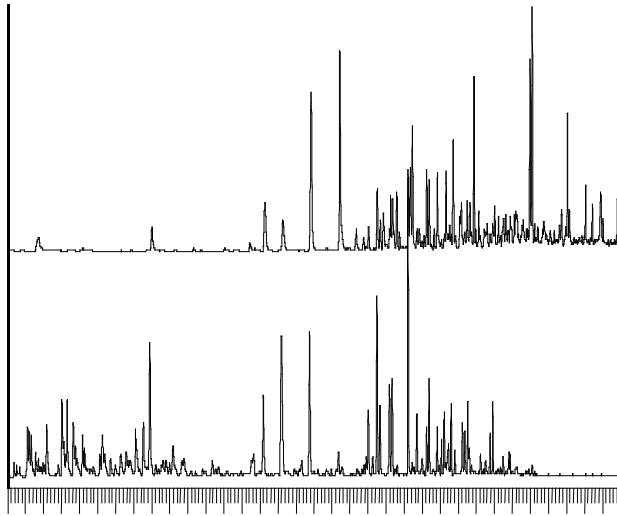


Abb. 14: Ottokraftstoff/Pyrolyseprodukte überlagert

Die Informationsgehalte und die weiteren Zuordnungsmöglichkeiten von Gaschromatogrammen, Totalionenchromatogrammen und Massenspektren werden stark von dem zur Probenaufbereitung angewendeten Verfahren und auch von dem Grad der Abdampfung eventueller Rückstände brennbarer Flüssigkeiten beeinflusst. Die Anwendung eines nicht geeigneten Aufbereitungsverfahrens oder ein hoher Abdampfungsgrad können Informationsverluste in Form fehlender oder verfälschter Signale bewirken, durch die eine Auswertung oder Zuordnung erschwert oder unmöglich gemacht wird. Gegenteilige Effekte bei der Spektrenauswertung werden durch Matrixkomponenten und Pyrolyseprodukte verursacht. Die Peaks dieser Verbindungen können die gemessenen Spektren überladen und charakteristische Peak-Muster überlagern oder auch gleiche bzw. ähnliche Fragmentationen liefern (siehe Abb. 14).

Durch mikrobiellen Abbau (*microbial degradation*) einzelner Kohlenwasserstoff-Verbindungen, z. B. durch Bakterien, können charakteristische Peak-Sequenzen in den Spektren und letztendlich die Konzentrationen von Einzelverbindungen verfälscht werden. Langkettige n-Alkane werden zuerst abgebaut. Es folgen die verzweigten iso-Alkane und aromatische Kohlenwasserstoffe, von denen wiederum die n-Alkan-substituierten bevorzugt abgebaut werden.

Der analytische Nachweis einer brennbaren Flüssigkeit aus Brandrückständen, häufig neben einer höheren Konzentration an Pyrolyseprodukten, und die weitere Zuordnung erfordern neben der geeigneten apparativen Ausstattung eine problemspezifische Arbeitsweise und umfassende Stoffkenntnisse auf dem Gebiet der Analytik.

Vergleichende Untersuchungen zur Frage der Herkunft oder der Materialgleichheit einer zur Brandlegung verwendeten Flüssigkeit sind in Einzelfällen möglich, erlauben aber fast immer nur eine *Wahrscheinlichkeitsaussage*.

Ein positiver Analysenbefund kann für sich allein bewertet nicht die Brandursache „Brandlegung unter Einsatz einer brennbaren Flüssigkeit“ beweisen. So spielt z. B. die Probenherkunft eine wichtige Rolle. Der Nachweis kohlenwasserstoffhaltiger Flüssigkeitsrückstände in einer Probe aus einer Kfz-Werkstatt ist anders zu beurteilen als in einer Probe, die aus einem Wohnraum stammt. Das Analyseergebnis muss immer im Konsens mit den übrigen Erhebungen zur Brandursachenfeststellung gesehen und bewertet werden. Ein negativer Analysenbefund bedeutet dagegen auch nicht zwangsläufig, dass keine Brandlegung unter Verwendung brennbarer Flüssigkeiten die Brandursache gewesen ist, sondern nur, dass Flüssigkeitsrückstände analytisch nicht bzw. nicht mehr nachweisbar waren.

5.3.2 Weitere chromatographische Verfahren

Unter dem Oberbegriff *Chromatographie* (griech.: *chroma* = Farbe; *graphein* = schreiben) werden zahlreiche physikalisch-chemische Trennverfahren zusammengefasst, bei denen Substanzgemische nach den Prinzipien der *Adsorption* und/oder der *Verteilung* aufgetrennt werden.

Die Bezeichnung ist historisch bedingt, da zunächst nur Farbstoffe oder farbige Substanzen getrennt wurden. Alle chromatographischen Verfahren arbeiten mit einer unbewegten, der *stationären Phase*, und einer bewegten (strömenden), der *mobilen Phase*. Stationäre Phasen können Feststoffe, Flüssigkeiten oder Gele sein, mobile Phasen sind entweder Flüssigkeiten oder Gase. Nach den Trennprinzipien unterscheidet man zwischen der *Adsorptionschromatographie*, bei der die stationäre Phase (*Adsorbens*) ein Feststoff ist, und der *Verteilungschromatographie*, bei der die stationäre Phase als Flüssigkeitsfilm auf der Oberfläche eines festen Trägermaterials haftet.

Zu den chromatographischen Trenn- und Analyseverfahren zählen, neben der Gas-Chromatographie (s. Kapitel 5.3.1.1), die Papier-, Dünnschicht- und Säulen-Chromatographie sowie die Hochleistungs-Flüssigkeits-Chromatographie (*HPLC*). Zur Anwendung in kleineren Teilbereichen der analytischen Materialuntersuchung kommen die *HPLC* sowie die Säulen- und die Dünnschicht-Chromatographie zur Anwendung.

5.3.2.1 Säulen-Chromatographie

Das Prinzip der Säulenchromatographie geht auf die Arbeiten des russischen Botanikers TSWETT im Jahre 1903 zurück, der in einem mit Calciumcarbonat als Adsorbens gefüllten Glasrohr die Blattfarbstoffe (*Chlorophyll*) auftrennte: Die stationäre Phase wird in einem Glasrohr (*Säule*), das am unteren Ende mit einem Hahn zu verschließen ist, eingefüllt. Das zu trennende Substanzgemisch wird, in einem Lösungsmittel gelöst, auf das Adsorbens am oberen Säulenende aufgebracht und nach der Adsorption mit einem oder mehreren Lösungsmitteln (**Eluenten**), die als mobile Phase durchlaufen, nacheinander eluiert. Die *Elution* kann als Herauslösen der aufgetrennten Substanzen aus der stationären Phase bezeichnet werden. Sie erfolgt aufgrund verschiedener physikalischer und auch chemischer Wechselwirkungen zwischen den zu trennenden Stoffen mit der stationären und der mobilen Phase.

Bei Kieselgel, Cellulose oder Stärke als stationäre Phasen erfolgt die Auftrennung auch nach dem Prinzip der Verteilungschromatographie, da diese Trennmaterialien bis zu 20 % Wasser enthalten. Die Auftrennung geschieht auch durch die Verteilung in dem anhaftenden Wasser und in den Eluenten.

Weitere Trennverfahren, wie die *Ionenchromatographie* mit dem Ionenaustausch als Trennprinzip und die *Gelchromatographie*, bei der der Ausschluss von Verbindungen nach ihrer Molekülgröße durch Molekularsiebe als Trennmaterialien erfolgt, werden auch in der (einfachen) Säulenchromatographie angewendet.

Bei allen Techniken wandern die zu trennenden Substanzen beim Eluieren, genau wie bei der Adsorption, unterschiedlich schnell durch die Säule und werden nacheinander (*fraktioniert*) am Säulenende aufgefangen.

5.3.2.2 Dünnschicht-Chromatographie

Die Dünnschicht-Chromatographie (DC), auch als *Planar-Chromatographie* bezeichnet (engl. *Thin-Layer-Chromatography – TLC*), ist eine speziell durchgeführte Fest-Flüssig- bzw. Flüssig-Flüssig-Trennung. Das Trennmittel, die stationäre Phase, wird dazu in dünnen Schichten von etwa 0,1 mm bis 0,25 mm Dicke auf eine Platte aus Glas, Kunststoff oder auch Aluminium-Folie (*DC-Platte*) aufgetragen. Diese DC-Platten sind heute als Fertigprodukte in den verschiedensten Ausführungen im Handel erhältlich.

Zur Durchführung einer DC-Trennung wird etwa 1 cm vor dem unteren Rand der DC-Platte eine Startlinie markiert. Auf diese Linie wird mit Hilfe einer Kapillare oder Pipette eine Lösung der zu trennenden Substanzen punktförmig (*Startpunkte*) aufgetragen. Vergleichssubstanzen werden dabei in gleicher Weise aufgetragen und mitchromatographiert. Zur Auftrennung der nebeneinander aufgetragenen Substanzpunkte wird die DC-Platte in eine sog. Entwicklungskammer (*DC-Kammer*), die etwa 1 cm hoch mit dem *Fließmittel* als mobile Phase gefüllt ist, gestellt. Das Fließmittel beginnt aufgrund von Kapillarwirkungen auf der Platte nach oben zu wandern und trennt dabei die einzelnen Komponenten nach ihrer Verteilungsaffinität zum Trennmittel auf. Kurz bevor das Fließmittel das Ende der DC-Platte erreicht hat (ca. 1 cm bis 2 cm vorher), wird die Platte aus der Entwicklungskammer herausgenommen, die Fließmittelfront markiert und die Platte getrocknet. Farbige Komponenten erscheinen mit ihrer Eigenfarbe als Farbflecke auf der Platte. Nicht farbige Stoffe können durch UV-Absorption, Fluoreszenz oder durch Aufsprühen so genannter Sprühreagenzien sichtbar gemacht werden.

Der Quotient aus dem Abstand vom Startpunkt der aufgetragenen Substanz bis zum Fleck einer getrennten Komponente zum Abstand des Startpunktes bis zur Fließmittelfront wird als *Retentionsfaktor* R_f bezeichnet:

$$R_f = \frac{\text{Abstand Startlinie/Fleck}}{\text{Abstand Startlinie/Fließmittelfront}}$$

In der Literatur sind für zahlreiche Verbindungen R_f – Werte angegeben. Unter vergleichbaren Chromatographie-Bedingungen ist der R_f – Wert eine stoffspezifische Größe.

Die in ihrer Ausführung recht einfache Dünnschicht-Chromatographie ist in den letzten drei Jahrzehnten zu einer bedeutenden instrumentellen Methode, der Hochleistungs-Dünnschicht-Chromatographie *HPTLC* (engl. *High-Performance-Thin-Layer-Chromatography*) weiterentwickelt worden. In der *HPTLC* sind alle Arbeitsschritte von der Probenauftragung bis hin zu einer quantitativen Auswertung automatisierbar. Diese Methode wird in erster Linie bei toxikologischen, medizinischen und pharmakologischen Untersuchungen sowie in der Umweltanalytik eingesetzt. Bei der Analytik von Brandrückständen werden Säulen- oder auch Dünnschicht-Chromatographische Trennmethode relativ selten angewendet. Mit diesen Verfahren können bestimmte Farbstoffe oder Markierungssubstanzen abgetrennt bzw. Flüssigkeitsproben oder Probenextrakte von störenden Komponenten gereinigt werden.

5.3.2.3 Hochleistungs-Flüssigkeits-Chromatographie

Eine spezielle und besonders effiziente Form der Säulen-Chromatographie ist die Hochleistungs-Flüssigkeits-Chromatographie *HPLC* (engl. *High-Performance-Liquid-Chromatography*), die zu Beginn auch als Hochdruck-Flüssigkeits-Chromatographie (engl. *High-Pressure-Liquid-Chromatography*) bezeichnet worden ist, da zu ihrer Durchführung sehr hohe Arbeitsdrücke erforderlich waren. Mit der Verkleinerung der Korngrößen der Trägermaterialien der stationären Phase von 150 μm bis 200 μm auf 3 μm bis 10 μm und der Verkürzung der Säule konnten auch die Arbeitsdrücke, die erforderlich sind, um die mobile Flüssigkeits-Phase durch die Trennsäule zu transportieren, deutlich verringert werden. Das hat zu den Bezeichnungen Hochauflösende (engl. *High-Performance*)-Flüssigkeits-Chromatographie oder *Schnelle-Flüssigkeits-Chromatographie* geführt.

Die Trennprinzipien bei der *HPLC* aufgrund der eingesetzten Trennmaterialien sind die *Adsorption*, die *Verteilung*, der *Ionenaustausch* und der *Ausschluss*. Adsorptions-Trennverfahren in Form der *Fest-Flüssig-Chromatographie* stellten die zuerst genutzte Methode dar, kommen aber heute kaum noch zur Anwendung. Die *Ionenchromatographie* mit dem Ionenaustausch als Trennprinzip und die *Gelchromatographie*, bei der der Ausschluss von Verbindungen nach ihrer Molekülgröße durch Molekularsiebe als Trennmaterialien erfolgt, werden relativ selten und nur in speziellen Analysebereichen eingesetzt. Das zurzeit in *HPLC*-Verfahren am häufigsten genutzte Trennprinzip ist die Verteilung, umgesetzt in der Flüssig-Flüssig-Chromatographie. Das Verfahren kann in Analogie zur Gas-Chromatographie gesehen werden, nur dass in der *HPLC* eine Flüssigkeit, in der *GC* ein Gas, jeweils unter hohem Druck als mobile Phase dient. Es werden die *Normal-Phasen-Chromatographie* und die *Umkehr-Phasen-Chromatographie* unterschieden.

Bei der Normalphasen-Chromatographie wird eine polare stationäre Phase in der Trennsäule verwendet und als mobile Phase weniger polare oder unpolare Eluenten, wie Hexan oder iso-Propylether. Bei der Umkehrphasen-Chromatographie (engl. *Reversed Phase – RP*) besteht die stationäre Phase dagegen aus wenig polaren oder unpolaren Trennmaterialien, und es werden polare mobile Phasen, wie Wasser, Methanol oder

Acetonitril, verwendet. Je nach Bindung der trennaktiven Flüssigkeit an das Trägermaterial unterscheidet man zwischen *immobilisierten Flüssigkeiten* oder *chemisch gebundenen Phasen*. Immobilisierte Flüssigkeiten haften auf dem Trägermaterial, z. B. Kieselgel oder Aluminiumoxid, nur durch physikalische Adsorption. Derartige Trennsysteme werden kaum noch eingesetzt. In über 75% der HPLC-Anwendungen kommen chemisch gebundene Phasen in Umkehrphasen-Chromatographie zum Einsatz. Auch hierbei sind Kieselgel, Aluminiumoxid oder Ionenaustauscherharze die Trägermaterialien. An sie wird die flüssige Trennphase chemisch gebunden.

Heutige HPLC-Systeme sind meistens modular aufgebaut und laufen computergesteuert. Sie bestehen aus einem Elutionsmittel-Reservoir, einem Pumpensystem, einer Probenaufnahme- oder Probeninjektions-Einheit, einer Trennsäule (aus Stahl- oder Glas-Rohr) und einem Detektor, der mit dem Auswerte- und Aufzeichnungssystem verbunden ist.

Zu einer HPLC-Bestimmung wird zunächst das Elutionsmittel mit der Pumpe durch die Trennsäule geleitet, bis sich ein stationärer Zustand mit konstantem Druck und stabilem Eluentenfluss eingestellt hat. Danach wird über die Aufgabe- oder Injektionsvorrichtung die zu analysierende Flüssigkeit oder eine Substanzlösung eingespritzt und mit dem Eluentenstrom auf die Trennsäule transportiert. Hier erfolgt eine Auftrennung der Komponenten nach ihrer Verteilungsaffinität zur Trennflüssigkeit. Ähnlich wie bei der normalen Säulenchromatographie werden die aufgetrennten Komponenten durch die mobile Phase eluiert und gelangen nacheinander zum Detektor. Das Detektorsignal wird in Abhängigkeit von der Retentionszeit aufgezeichnet und so ein *HPLC-Chromatogramm* mit Peaks für jede aufgetrennte Komponente erzeugt. Als Detektoren werden u. a. wellenlängenselektive Detektoren oder Arrays eingesetzt (*UV-Detektoren*, *Fluoreszenz-Detektoren* und *Photodioden-Array-Detektoren*). Zum Nachweis werden die Eigenschaften des im Eluenten gelösten Stoffes gemessen. Die Auswertung und Identifizierung erfolgen mittels Vergleichssubstanzen, analog wie in der Gaschromatographie.

Zur Verbesserung der Identifizierungsmöglichkeiten kann die HPLC auch mit einem Massenspektrometer als Detektor gekoppelt werden. Diese Analysentechnik wird als LC-MS (*Liquid Chromatography-Mass-Spectrometry*) bezeichnet. Die Kopplung und auch die anschließende Fragmentierung zu Ionen erfordern im Vergleich zur GC-MS-Kopplung einen höheren Aufwand. Die Aufzeichnung von Massenspektren und die Identifizierung von Verbindungen erfolgen in entsprechender Weise.

Die HPLC wird zur qualitativen und zur quantitativen Bestimmung organischer Verbindungen eingesetzt, die sich nicht in eine gasförmige Phase überführen lassen. Hauptanwendungsgebiete sind toxikologische, medizinisch-chemische und umweltanalytische Untersuchungen. Im brandanalytischen Bereich können HPLC-Methoden zur Bestimmung von Farb- und Kennzeichnungsstoffen sowie von höhermolekularen Verbindungen angewendet werden. Zurzeit werden Untersuchungen durchgeführt, die HPLC mit einem Flugzeit-Massenspektrometer (*TOF-MS – Time-Of-Flight-Mass-Spectrometer*) zu koppeln. Damit sollen Additive in Ottokraftstoff- und Dieselloststoff-Materialien bestimmt werden, um Hinweise auf die jeweiligen Hersteller zu erlangen.

5.3.3 Spektroskopische Methoden

Spektroskopische Methoden zählen neben der Chromatographie und der Elektroanalytik zu den wichtigsten analytischen Untersuchungsmethoden. Unter der Bezeichnung *Spektroskopie* werden alle Methoden zusammengefasst, bei denen die Wechselwirkungen der elektromagnetischen Strahlung mit Atomen, Molekülen, aber auch Ionen der Materie, also der zu untersuchenden Materialprobe, zu einer analytisch verwertbaren Information, einem *Spektrum*, führen. Spektren können sowohl zur qualitativen wie auch zur quantitativen Analyse verwendet werden. Die qualitative Messung eines Spektrums als Funktion eines Wellenlängenbereiches der Elektromagnetischen Strahlung wird dabei allgemein als *Spektroskopie*, die quantitative analytische Auswertung als *Spektrometrie* bezeichnet.

Elektromagnetische Strahlung tritt in Form von Radiowellen, Mikrowellen, Wärme- und Infrarot-Strahlung (*IR*), sichtbarem Licht, Ultravioletter-Strahlung (*UV*), Röntgen- und Gammastrahlung γ -(*gamma*)-Strahlung in Erscheinung. Je nach Art und Weise der Wechselwirkung einer Materialprobe mit der elektromagnetischen Strahlung wird zwischen *Absorptions*-, *Emissions*- und *Fluoreszenz*-Spektroskopie unterschieden. Bei der Absorption erfolgt eine Schwächung der Strahlung durch die Probe, bei der Emission wird eine Probe angeregt und sendet (emittiert) Strahlung aus. Im Fall der Fluoreszenz wird die emittierte Strahlung wellenlängenselektiv ausgewertet. Eine Übersicht über die Bezeichnungen und die Bereiche des elektromagnetischen Spektrums sowie die jeweilige Wechselwirkung mit der Materie und die daraus resultierende spektroskopische Methode zeigt die folgende Tabelle:

Tab. 4: Spektralbereiche der Elektromagnetischen Strahlung

Anregung Wechselwirkung	Molekül-Rotation		Molekül-Schwingung				Elektronen-Anregung				
Spektroskopische Methode	Mikrowellen-Absorption		Infrarot-	UV-VIS-Spektroskopie			Röntgen-Fluoreszenz-				
Spektralbereich-Bezeichnung	Radio-	Mikro-	Infrarot [IR]		Sichtbar	UV	Röntgen				
	wellen	wellen	<i>fernes</i>	<i>mittleres</i>	<i>nahes</i>						
Wellenlänge [m] $\lambda = \frac{c}{\nu}$	10	1	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}	10^{-8}	10^{-9}
		1 m		1 mm			1 μm			1 nm	
Frequenz [Hz] $\nu = \frac{c}{\lambda}$	10^7	10^9	10^{11}	10^{13}	10^{15}	10^{17}					
Wellenzahl [cm^{-1}] $\tilde{\nu} = \frac{1}{\lambda}$	10^{-3}	10^{-1}	10	10^3	10^5	10^7					

Bei Materialuntersuchungen im Rahmen der Brandanalytik wird die IR-Spektroskopie im Vergleich mit anderen spektroskopischen Methoden am häufigsten eingesetzt.

5.3.3.1 Infrarot-Spektroskopie

Durch Absorption von Strahlung im *infraroten Bereich* des elektromagnetischen Spektrums werden in den Molekülen einer zu untersuchenden Substanz Molekülrotationen und Molekülschwingungen angeregt.

Die Einteilung der elektromagnetischen Strahlung, die sich in Luft konstant mit Lichtgeschwindigkeit $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$ ausbreitet, erfolgt nach der Wellenlänge λ und der Frequenz ν . Anstelle der Angabe in Wellenlängen ist in der Spektrendarstellung die Angabe in Wellenzahlen $\tilde{\nu}$ üblich. Die Angabe von Wellenzahlen hat den Vorteil, dass diese der Frequenz und damit auch der Energie direkt proportional sind ($E = h \nu$).

Der Infrarotbereich des elektromagnetischen Spektrums erstreckt sich von etwa $0,78 \mu\text{m}$ bis $1000 \mu\text{m}$ ($\Delta 12800 \text{ cm}^{-1}$ bis 10 cm^{-1} ; s. folgende Tabelle).

Tab. 5: Infrarot-Bereiche des elektromagnetischen Spektrums

IR-Bezeichnung	Nahes – IR NIR	Mittleres – IR MIR	Fernes – IR FIR
Wellenlänge $\lambda = \frac{c}{\nu} \quad \text{m}$	$0,78 \mu\text{m} - 2,5 \mu\text{m}$	$2,5 \mu\text{m} - 50 \mu\text{m}$	$50 \mu\text{m} - 1000 \mu\text{m}$
Frequenz $\nu = \frac{c}{\lambda} \quad \text{Hz}$	$4 \cdot 10^{14} - 1,2 \cdot 10^{14}$	$10^{14} - 6 \cdot 10^{12}$	$6 \cdot 10^{12} - 3 \cdot 10^{11}$
Wellenzahl $\tilde{\nu} = \frac{1}{\lambda} \quad \text{cm}^{-1}$	12800 – 4000	4000 – 200	200 – 10

IR-Spektren werden normalerweise im Wellenzahlenbereich von etwa $4000 \text{ cm}^{-1} - 400 \text{ cm}^{-1}$ (Δ Wellenlänge von $2,5 \mu\text{m} - 100 \mu\text{m}$) aufgenommen.

Ein konventionelles, wellenlängendispersives IR-Spektrometer, besteht aus einem anregenden *IR-Strahler*, der ständig einen breiten IR-Bereich abstrahlt, einem *Monochromator* (Prisma oder Beugungsgitter), einem *Detektor* sowie einem Registrier- und Auswertesystem. Bei den in der Regel als Zweistrahlgerät aufgebauten Spektrometern wird die Strahlung des IR-Strahlers (*Nernst-Stifte*, *Globare* bei $1200 \text{ }^\circ\text{C}$ bis $1500 \text{ }^\circ\text{C}$) durch ein Spiegelsystem in zwei Lichtstrahlen gleicher Intensität aufgeteilt.

Ein Lichtstrahl (*Mess-Strahl*) durchläuft die zu messende Probe, der andere dient als *Referenzstrahl* zum Nullabgleich und wird z. B. durch eine Vergleichsküvette geleitet. Danach werden beide Strahlen über eine, mit einer festen Frequenz rotierende Spiegelvorrichtung auf den Monochromator reflektiert. Durch Drehen des Prismas oder Beugungsgitters wird an dem Austrittsspalt ein Spektrum erzeugt und zum Detektor geleitet. Als Detektor dient ein hochempfindliches Thermoelement, dessen Verstärker bei gleicher Strahlungsintensität von Mess- und Vergleichssignal auf Null abgeglichen ist. Wird in einer Probe Strahlungsenergie absorbiert, entsteht ein Strom, der über einen Motor eine Kammblyende im Referenzstrahl steuert, bis am Thermoelement wieder der Nullabgleich eintritt. Die Position der Kammblyende ist ein Maß der Strahlungsabsorption, die Position des Prismas oder Beugungsgitters legt die dazugehörige Wellenlänge (Wellenzahl) fest.

5.3.3.2 Fourier-Transformation-Infrarot-Spektroskopie

Durch Einsatz der *Fourier-Transformation-Technik* wurde die IR-Spektroskopie entscheidend weiter verbessert. Fourier-Transform-Infrarot-Spektrometer (*FT-IR Spektrometer*) haben die dispersiven konventionellen Gerätesysteme weitgehend verdrängt. Während bei einem Gitterspektrometer die Absorptionsmessung jeweils direkt bei einer Wellenlänge (Wellenzahl) nacheinander erfolgt, wird bei der FT-IR-Spektroskopie das gesamte IR-Spektrum in einem *Interferogramm* auf einmal erfasst. Zentrale Einheit dazu ist ein *Interferometer*.

Die von der IR-Strahlungsquelle (s. o.) austretende Strahlung trifft auf einen Strahlungsteiler, eine halbdurchlässige *Interferometerplatte*. Dort wird eine Hälfte der Strahlung auf einen festen Spiegel reflektiert, die andere Hälfte zu einem beweglich angebrachten Spiegel durchgelassen. Die beiden rücklaufenden Strahlungshälften treffen auf den Strahlungsteiler und interferieren aufgrund des optischen Wegunterschieds miteinander. Dieser Interferenz-Lichtstrahl passiert dann die Probe und wird auf dem Detektor fokussiert. Vom Detektor wird die Intensität der IR-Strahlung in Abhängigkeit von der Auslenkung des beweglichen Spiegels registriert und als *Interferogramm* (Überlagerung aller im Spektrum auftretenden Wellenlängen) aufgezeichnet.

In einem Computer wird das mathematische Verfahren der *Fourier-Transformation* oder *Fourier-Analyse* durchgeführt, um aus dem Interferogramm Spektraldaten zu erhalten. Die Intensitätssignale als Funktion der Zeit werden als Funktion der Wellenlänge (Wellenzahl) berechnet. Dadurch ergibt sich zunächst ein Einkanalspektrum. Erst aus dem Intensitätsvergleich mit einem Referenzspektrum ohne Probe (*Untergrundspektrum*) ergibt sich eine den dispersiv gemessenen Spektren analoge Darstellung.

Die FT-IR Spektroskopie hat drei bedeutende Vorteile:

- hohe Empfindlichkeit,
- schnelle Ausführbarkeit durch sehr kurze Messzeiten und
- sehr genaue, reproduzierbare Messung der Wellenlängen (Wellenzahlen).

In einem konventionellen Gitterspektrometer wird die Absorptionsintensität einer Probe als Funktion der durch den Monochromator kontinuierlich geänderten Wellenlänge aufgenommen. So wird immer nur ein kleiner Wellenlängenausschnitt erfasst und nur ein Bruchteil der von der IR-Quelle ausgesandten Strahlung erreicht den Detektor; der Rest geht verloren. In einem FT-IR Gerät erreichen alle von der Quelle ausgehenden Strahlen simultan den Detektor. Die vollständige Intensität der Quelle wird ausgenutzt und bewirkt ein sehr hohes Signal-Rausch-Verhältnis in den IR-Spektren. Die kurzen Aufnahmezeiten für ein FT-IR Spektrum ergeben sich aus der Zeit für die Spiegelbewegung, die erforderlich ist, um den gesamten Wellenlängenbereich zu erfassen, und der Rechenzeit für die Fourier-Transformation. Insgesamt ist das weniger als eine Minute, um ein komplettes Spektrum zu erstellen. Eine konventionelle Spektrenaufnahme dauert dagegen zwischen 10 und 15 Minuten.

5.3.3.3 Aufnahme von Infrarot-Spektren

Obwohl IR-Spektren *Absorptionsspektren* sind, wird bei Messungen nicht die direkte Absorption der Strahlung in einer Probe angegeben, sondern die *Transmission* (Durchlässigkeit) T . Das ist Verhältnis der IR Strahlungsintensität I , die durch die Probe geht, zur IR Strahlung I_0 , die in das System eintritt:

$$T = \frac{I}{I_0}$$

In einigen Spektrendarstellungen wird als spektrales Absorptionsmaß auch die Extinktion $E = \log I_0 / I = \log 1 / T$ aufgezeichnet.

Im IR-Spektrum wird die Transmission der IR-Strahlung durch die Probe in Abhängigkeit von der Wellenzahl $\tilde{\nu}$ registriert. Die Extinktions- oder Transmissionsmaxima werden auch als *Absorptionsbanden* bezeichnet.

Bedingung für die Anregung von Schwingungen in einem Molekül durch Absorption von IR-Strahlung ist, dass mit der Schwingung eine periodische Änderung des Dipolmoments erfolgt. Nur solche Schwingungsvorgänge sind IR-*aktiv* und führen zu einer Strahlungsabsorption. Symmetrische, zweiatomige Moleküle wie z. B. Wasserstoff, Sauerstoff oder Stickstoff sind demzufolge IR-*inaktiv* und ergeben keine IR-Spektren. Je nach Schwingungsrichtung in einem Molekül wird zwischen Valenzschwingungen und Deformationsschwingungen unterschieden. Diese Schwingungsformen können sowohl symmetrisch wie auch asymmetrisch auftreten. Ein Beispiel für die verschiedenen Valenz- und Deformationsschwingungen zeigen die folgenden FT-IR-Spektren von Polyethylen (*PE*) und Polypropylen (*PP*):

Auf dem Gebiet der Brandanalytik wird die IR-Spektroskopie, dabei in den letzten Jahren insbesondere die FT-IR-Spektroskopie, zur schnellen Identifizierung fester und flüssiger Materialproben eingesetzt, z. B. bei der Untersuchung von unkonventionellen Spreng- und Brandvorrichtungen (USBV) oder bei der Materialfeststellung von brandbeschädigten Kunststoffbehältern.

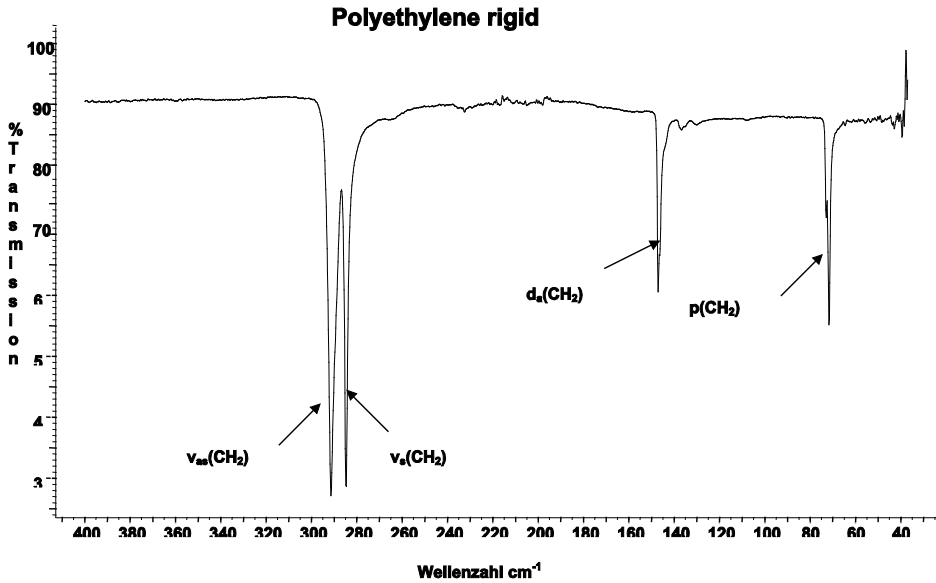


Abb. 15: FT-IR-Spektrum eines HD-Polyethylens

[ν_{s} = sym. Valenzschwingung; ν_{as} = asym. Valenzschwingung; ds = sym. Deformationsschwingung]

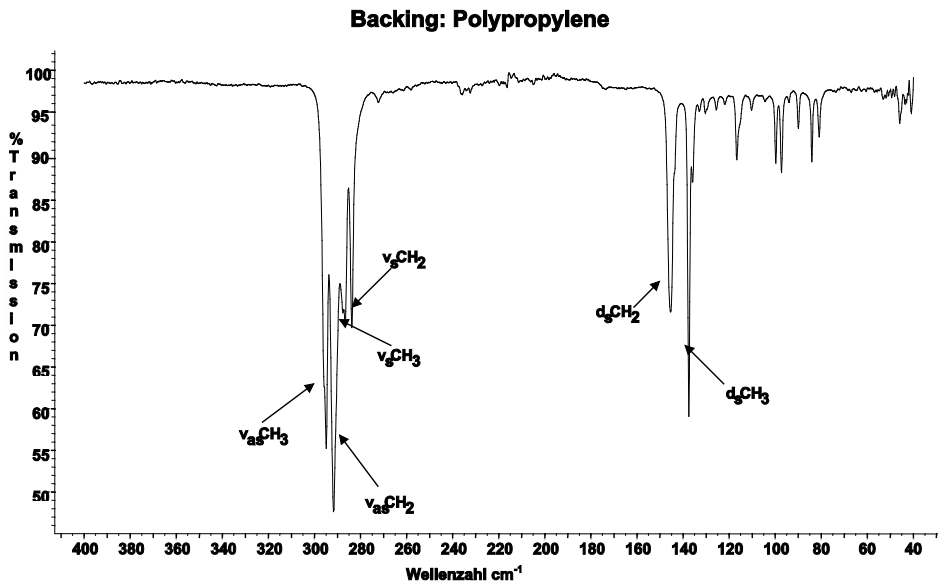


Abb. 16: FT-IR-Spektrum eines Polypropylens

[ν_{s} = sym. Valenzschwingung; ν_{as} = asym. Valenzschwingung; ds = sym. Deformationsschwingung]

Der Vergleich der beiden Spektren von *PE* und *PP* zeigt, dass bestimmte funktionelle Gruppen, hier die =CH₂-Gruppe, immer wieder an fast gleichen Stellen des IR-Spektrums vergleichbare Absorptionen zeigen, auch wenn sie in verschiedenen Verbindungen vorkommen. Das Gleiche gilt auch für andere funktionelle Gruppen, wie –CH₃, –C=O, –C≡N, –C=C–, –OH, =NH u. a. Dadurch kann die IR-Spektroskopie zur Identifizierung und zur Strukturaufklärung unbekannter Verbindungen eingesetzt werden. Über die Intensität bestimmter Absorptionsbanden funktioneller Gruppen sind auch quantitative analytische Bestimmungen möglich. Durch die Einführung der FT-IR-Technik wurden auch Messungen von mikroskopisch kleinen Proben (*Mikroskop-FT-IR*) möglich. FT-IR-Spektrometer können als Detektoren mit Gaschromatographen gekoppelt (*GC-FT-IR Kopplung*) werden.

5.3.4 Thermische Analyse

Zur Untersuchung und Beurteilung des thermischen Verhaltens und des thermisch bedingten Abbaus von Stoffen werden Methoden der *Thermischen Analyse* angewendet. Sie wird deshalb auch zur Feststellung exothermer Reaktionen eingesetzt. Dies kann als Vortest für chemische *Selbsterwärmungsvorgänge* (*Selbstentzündung*) verwendet werden. Es werden für solche Untersuchungen die *thermoanalytischen Verfahren* Thermogravimetrie (*TG*), die Differential-Thermo-Analyse (*DTA*) und die Dynamische-Differenz-Kalometrie (*DDK*) oder Differential-Scanning-Calorimetry (*DSC*) eingesetzt, wobei die *DTA* als eine qualitative und die *DSC* als eine quantitative Methode zu betrachten sind.

Definition gemäß *DIN 51 005*:

Die **Thermische Analyse** ist der Oberbegriff für Methoden, bei denen physikalische und chemische Eigenschaften einer Substanz, eines Substanzgemisches und/oder von Reaktionsgemischen als Funktion der Temperatur oder der Zeit gemessen werden, wobei die Probe einem bestimmten Temperaturprogramm unterworfen wird.

5.3.4.1 Thermogravimetrie

Die **Thermogravimetrie** ist:

„eine thermoanalytische Methode, bei der die Masse und/oder die Massenänderung einer Probe gemessen wird, die einem Temperaturprogramm unterworfen ist.“

Das zugehörige Messinstrument ist die Thermowaage (Abb.17). Sie besteht aus einem Wägesystem, einer Probenhalterung, einer Einrichtung zur Temperaturmessung, einem Ofen, einer Temperatursteuerung, einer Datenerfassungseinrichtung und im Regelfall einer Einrichtung zur Erzeugung einer definierten Atmosphäre.

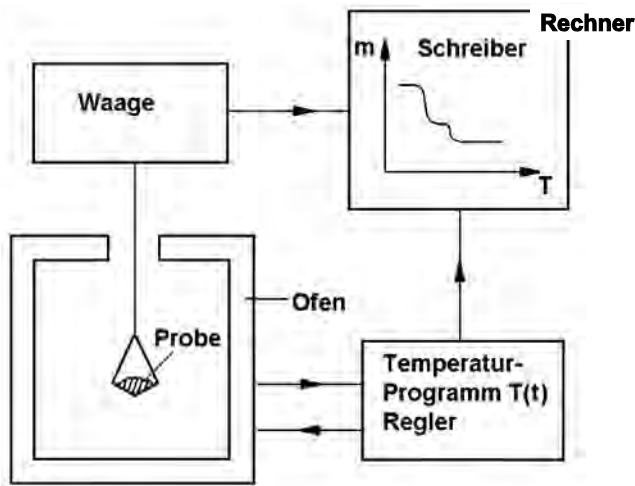


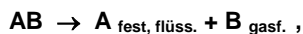
Abb. 17: Messeinrichtung zur Thermogravimetrie (Thermowaage)

Ein zentrales apparatives Problem der TG ist die Trennung des Wägesystems von der beheizten Messkammer und den dort evtl. auftretenden aggressiven Gasen.

In modernen Thermowaagen befindet sich die Waage entweder oberhalb eines möglichst kleinen Ofens, wobei der Tiegel mit der Probe an einem langen leichten Träger hängt, oder der Waagebalken ragt in den Ofen hinein und trägt direkt die Probe (horizontaler Aufbau).

Eine thermogravimetrische Untersuchung gibt Aufschluss über die Masseänderungen einer Probe, die Geschwindigkeit der Masseänderung (die DTG-Kurve, die die 1. Ableitung der TG-Messung darstellt, gibt die Geschwindigkeit der Massenänderung an) und die zugehörigen Reaktionstemperaturen. Thermogravimetrische Untersuchungen werden unter anderem bei solchen Vorgängen wie Dehydratation, Dehydroxylation, Decarbonisierung und anderen Salzzersetzungen erfolgreich angewendet.

Gilt für eine chemische Zersetzung



dann lassen sich für die charakteristischen Temperaturen die entsprechenden Massenänderungen, hervorgerufen durch die Abspaltung gasförmiger Reaktionsprodukte, ermitteln. So kann zunächst auf die Natur der Stoffe A und B geschlossen werden. Bei Kenntnis der Stöchiometrie sind weiterhin quantitative Angaben zum Gehalt an Zwischen- und Endprodukten möglich. Bei Gemischen kann aus der Höhe von Zersetzungsstufen der Masseanteil zersetzlicher Bestandteile berechnet werden.

Demzufolge sind TG-Untersuchungen geeignet, Substanzen hinsichtlich der Phasenanalyse zu charakterisieren bzw. thermochemische Reaktionsgleichungen anzugeben.

Einen bedeutenden Anwendungsfall der Thermogravimetrie stellt die Mineralanalyse, z. B. von Bauxit, Ton und Kaolin, dar.

Thermogravimetrische Messungen sind jedoch nicht nur auf Zersetzungsreaktionen beschränkt, sondern gelten ebenso für Reaktionen der Probe mit der Atmosphäre, z. B. Oxidationen mit Luftsauerstoff. Die Atmosphäre im Probenraum kann die Probenreaktion direkt beeinflussen, denn sie ist an der Wärmeübertragung vom Ofen zur Probe beteiligt und bestimmt so die Proben temperatur mit.

Die Thermogravimetrie ist also im Allgemeinen nur bei Beteiligung flüchtiger Komponenten möglich (Ausnahmen Festkörperreaktionen in Form von elektrischen oder magnetischen Umwandlungen). Dies stellt eine Einschränkung ihrer Einsatzmöglichkeiten gegenüber der Differenzthermoanalyse oder der Differenz-Kalorimetrie dar, denn mit diesen Verfahren sind auch Untersuchungen reiner Festkörperreaktionen möglich.

Aus diesem Grund setzt man die TG häufig simultan mit der DTA oder der DSC ein.

Es ist noch zu sagen, dass die *TG-Kurve* ähnlich wie die *DTA-* oder *DSC-Kurve* von zahlreichen Einflussgrößen abhängig ist. Es bestehen jedoch einige prinzipielle Unterschiede, z. B.:

Die *TG-Kurve* ist eine integrale Messkurve; das Messsignal ist eine Zustandsgröße (Masse m) und nicht ihre Änderungsgeschwindigkeit. Zum Vergleich mit *DTA-* und *DSC-Kurven*, die eine Änderungsgeschwindigkeit anzeigen, wird zweckmäßigerweise die *DTG-Kurve* (dm/dt) herangezogen.

Die *TG-Kurve* ist nicht bereits durch die Meßmethode verschmiert, d. h. die zu einem Zeitpunkt angezeigte Masse m bzw. dm/dt sind die tatsächliche Probenmasse bzw. ihre Änderungsgeschwindigkeit.

5.3.4.2 Differential-Thermo-Analyse

Die **Differential-Thermoanalyse** wird unter anderem angewendet bei der:

- Bestimmung charakteristischer Temperaturen einer Umwandlung,
- Bestimmung der Umwandlungsdauer,
- Bestimmung des Vorzeichens der Umwandlungswärme,
- semiquantitativen Bestimmung der Größe kalorischer Effekte;

sowie zur:

- Reinheitsprüfung,
- Ermittlung von Phasendiagrammen,
- Identifizierung von Komponenten in Gemischen,

- Überprüfung der Wirkung von Zusatzstoffen,
- Untersuchung des Verbrennungsverhaltens,
- Optimierung der Wärmebehandlung und
- sicherheitstechnischen Untersuchungen.

Die meisten Stoffe unterliegen bei Einwirkung von Wärme charakteristischen chemischen und physikalischen Umwandlungen. Diese Umwandlungen werden durch Enthalpie- und/oder Masseänderungen begleitet. Als eine geeignete Methode zur Beurteilung des Verhaltens von Stoffen bei Einwirkung externer Wärme und deren thermisch bedingten Abbaus hat sich die Thermoanalyse erwiesen. Im Besonderen werden für solche wie im Rahmen dieser Betrachtungen durchzuführende Untersuchungen die Thermogravimetrie (TG), die Differential-Thermo-Analyse (DTA) aber auch die Differential-Scanning-Calorimetry (DSC) eingesetzt. In Form von DTA und TG besteht die Möglichkeit der Erfassung von thermischen Effekten und Masseänderungen. Bei der DTA erfolgt im Zuge der Erhitzung des Probenmaterials eine Registrierung thermischer Effekte (Enthalpieänderung) durch Messung einer Differenztemperatur zwischen dem Untersuchungsmaterial und einer chemisch inerten sowie physikalisch beständigen Substanz (meist Al_2O_3). Bei der TG erfolgt die Registrierung der sich in Abhängigkeit von der Temperatur ergebenden Masseabnahme der Probe. Bei der DSC wird die pro Zeiteinheit der Probe zugeführte Wärme registriert bzw. die nach Beginn der exothermen Reaktion von der Probe freigesetzte Wärme; das bedeutet, es erfolgt eine quantitative Erfassung der Wärmestromdifferenz.

Die nachfolgenden Aussagen sollen deshalb auch beispielhaft verstanden werden. Sie treffen in ähnlicher Weise bei einer Vielzahl von zündfähigen bzw. brennbaren Stoffen zu. So ist festgestellt worden, dass:

- stark exotherme Prozesse in der Regel mit einem großen Masseverlust in der Probe verknüpft sind,
- bei geringeren Aufheizungsgeschwindigkeiten exotherme Reaktionen bei niedrigeren Temperaturen eintreten,
- die Geschwindigkeit der Masseabnahme bei der Einleitung einer oxidierenden Atmosphäre (Luft) ansteigt, und die Masseabnahme (keine Feuchtigkeit) früher beginnt,
- bei der Verwendung inerter Ofenatmosphären bzw. bei vom Umgebungsdruck abweichenden Druckverhältnissen in der Ofenatmosphäre nicht nur Änderungen bei den Peaklagen sondern teilweise auch im Charakter der Peak's (*endo/exo*) Umkehrungen zu beobachten sind,
- Korngröße und Packungsdichte die Reaktionsabläufe beeinflussen, d. h. geringere Korngrößen forcieren ebenso wie zunehmende Packungsdichten die Reaktionsabläufe, so dass unter anderen Bedingungen festgestellte Mehrstufen-Reaktionen zu einem einzigen exothermen Reaktionsschritt verschmelzen.

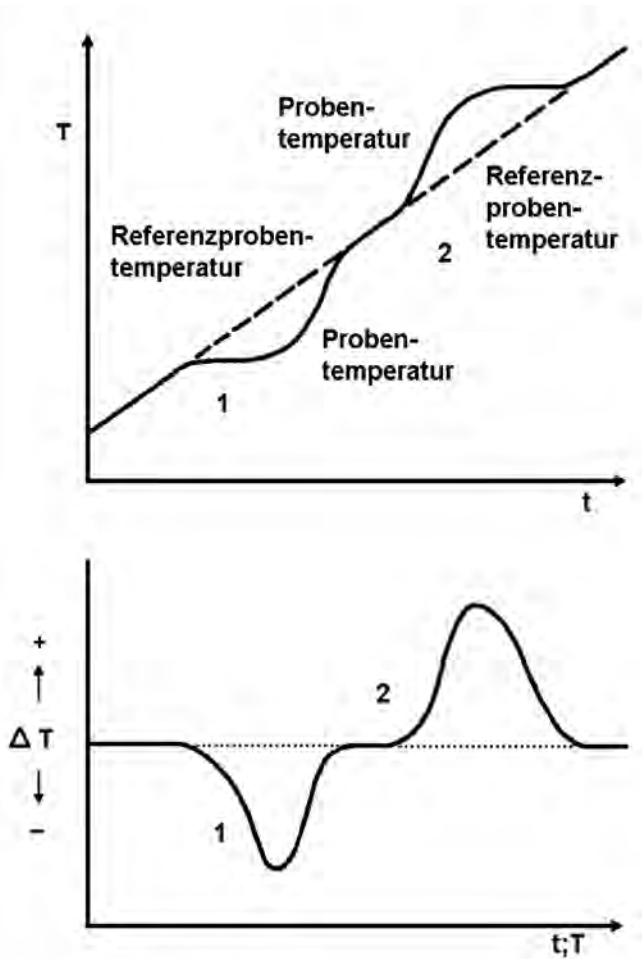


Abb. 18: DTA – Kurve bei Aufheizung

oben: Verlauf der Temperaturen von Probe und Referenzprobe

unten: Differenz als Messsignal

1: Verlauf bei einem endothermen Vorgang

2: Verlauf bei einem exothermen Vorgang

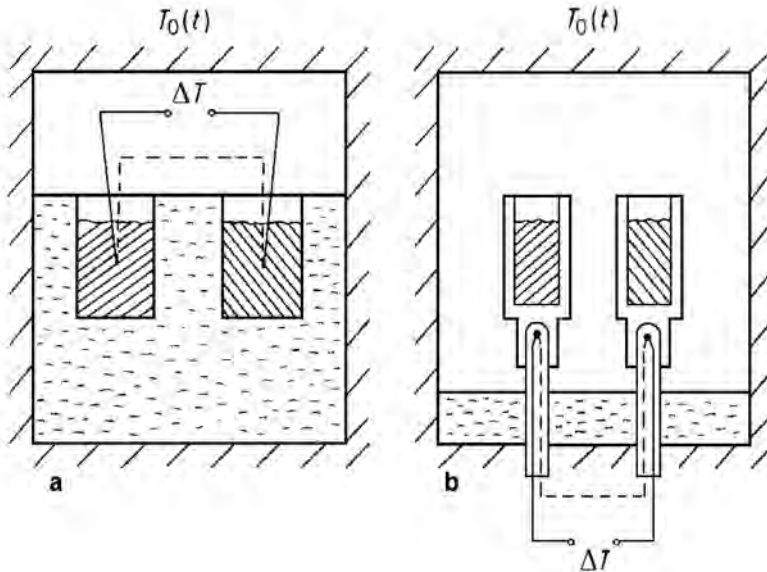


Abb. 19: Bauarten von DTA – Geräten

- a) Temperatursensoren tauchen in die Probensubstanzen ein; Blocksystem
 b) Tiegels sind auf die Temperatursensoren aufgesteckt; Einzeltiegelsystem, $T_0(t)$ Ofentemperatur

5.3.4.3 Dynamische-Differenz-Kalorimetrie

Auch im deutschen Sprachgebrauch hat sich für die *Dynamische Differenz Kalorimetrie* die englische Bezeichnung *DSC – Differential Scanning Calorimetry* durchgesetzt. Bei DSC-Messungen wird die Probe einem Temperatur-Zeit-Programm unterworfen. Diese Betriebsart wird als dynamisch bzw. als „*scanning*“ bezeichnet. Dabei wird die pro Zeiteinheit freigesetzte Wärme bzw. die nach Beginn einer exothermen Reaktion von der Probe freigesetzte Wärme registriert, es erfolgt eine quantitative Erfassung der Wärmestromdifferenz. Gemessen wird die Differenz der Wärmeströme vom Heizelement (*Ofen*) zur Probe und vom Heizelement (*Ofen*) zur Vergleichsprobe (Referenz).

Zur Messung der Wärmeströme werden zwei Messprinzipien verwendet:

die Dynamische *Wärmestrom-Differenz-Kalorimetrie*

oder

die Dynamische *Leistungskompensations-Differenz-Kalorimetrie*

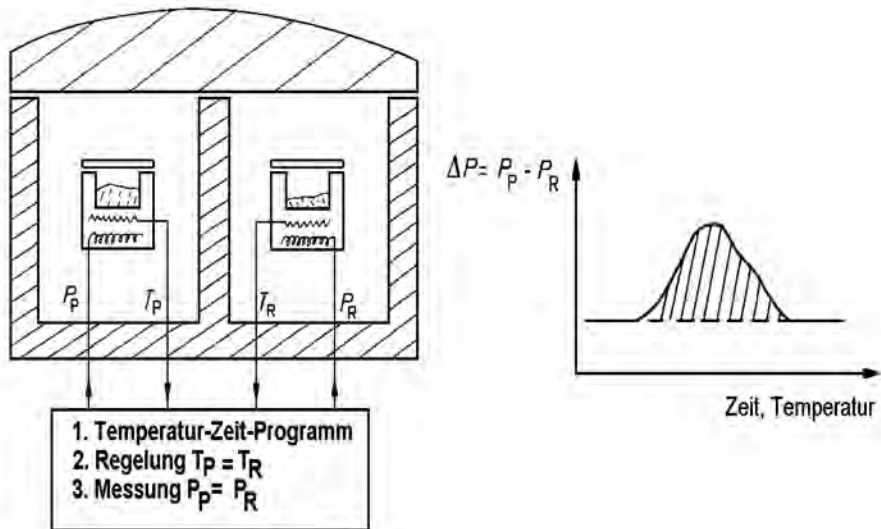


Abb. 20: Ideales Leistungskompensations – Differenz – Kalorimeter.

Messprinzip der Leistungskompensationsmethode:

Probe und Referenz werden vom Wärmetauscher über definierte Wärmeleitstrecken, die aus einer oder mehreren Thermosäulen bestehen, aufgeheizt oder abgekühlt. Solange die Probe nicht reagiert, ist die Wärmestromdifferenz konstant. Wird aus der Probe während der Umwandlung Wärme frei oder nimmt sie Wärme auf, so ändert sich der Wärmestrom vom Ofen zur Probe. Diese Wärmestromänderung entspricht der in der Probe umgesetzten Energie. Im Fall einer *exothermen* (*endothermen*) Probenreaktion verringert (erhöht) der Regler die Heizleistung der Probenheizung derart, dass sich die zugehörige Temperatur trotz der ablaufenden Reaktion weiterhin mit der vorgegebenen Heizrate ändert. Die Heizleistungsdifferenz wird als elektrische Spannung angezeigt. Sie ist das Messsignal und entspricht dem gesuchten Reaktionswärmestrom. Die Reaktionswärme ist gleich der Differenz der Heizenergien.

5.3.4.4 Selbsterhitzungsvorgänge

Bei der Brandursachenfeststellung muss häufig auch die Möglichkeit von Selbsterhitzungsvorgängen, die eine *Selbstentzündung* (SE) bewirken können, in Betracht gezogen werden. Grundsätzlich sind dabei *biologische* und *chemische Selbsterhitzungsprozesse* zu unterscheiden. (s. Kap. 1.4.2.9 und 4.2.1.1 sowie 4.4) Die biologische SE spielt im landwirtschaftlichen Bereich eine nicht zu vernachlässigende Rolle als Brandursache. Im industriellen bzw. im häuslichen Bereich überwiegen dagegen chemische Selbsterhitzungsvorgänge.

Chemische Selbstentzündung

Chemische Selbsterhitzungsprozesse beruhen darauf, dass viele chemische Reaktionen unter Abgabe von Wärmeenergie ablaufen (*exotherme Reaktionen*). Wird die Abfuhr dieser Wärmeenergie an die Umgebung durch Isolation oder durch erhöhte Umgebungstemperaturen behindert, verbleibt ein Teil dieser Reaktionswärme im reagierenden System und erhöht dessen Temperatur, ein Selbsterhitzungsprozess wird ausgelöst. Bei den meisten chemischen Reaktionen führt eine Temperaturerhöhung zur Steigerung der Reaktionsgeschwindigkeit, wodurch sich dann auch die freigesetzte Wärmemenge weiter erhöht, was wiederum einen weiteren Temperaturanstieg im System zur Folge hat. Dieser Rückkoppelungsprozess kann schließlich in Temperaturbereiche führen, die zu einer SE des reagierenden oder einer Zündung des umgebenden Materials führen. Ob bestimmte Substanzen oder Substanzmischungen zur Selbsterhitzung fähig sind, wird durch die thermoanalytischen Verfahren der Thermischen Analyse (TA) untersucht.

Biologische Selbstentzündung

Biologische Selbsterhitzungsprozesse können in gestapelten oder auch gepressten biologischen Futtermitteln, wie Heu, Stroh oder Klee, aber auch in anderen pflanzlichen Materialien, wie Baumwolle, Getreide oder Saatgut, Sägemehl u. a. auftreten. Voraussetzung für die Erhitzungsprozesse ist das Zusammenwirken verschiedener Faktoren, wie der Feuchtigkeits- und der Nährstoffgehalt, die Dichte der Lagerung sowie die Größe und Art des Stapels. Die Erwärmung des gestapelten oder gepressten biologischen Materials verläuft dabei in einer Kette von energiefreisetzenden, biologischen und chemischen Prozessen. Durch die pflanzliche Atmung (*Zellatmung*) und pflanzliche Fermentierung, den Stoffwechsel *mesophiler* und *thermophiler* Mikroorganismen und daran anschließende exotherme chemische Zersetzungsreaktionen, können Temperaturen von über 250 °C erreicht werden, die bei Zutritt von Luftsauerstoff zu einer Entzündung des Materials ausreichen.

In der Phase der Temperaturerhöhung treten charakteristische morphologische Veränderungen in Form von Braunfärbungen der verschiedenen Fermentationsstufen und im Erweichen der Materialstruktur auf. Die Aktivität von Mikroorganismen zeigt sich in einer deutlichen Verschiebung der Keimzahlenverhältnisse von thermophilen und mesophilen Mikroorganismen. Am Brandobjekt weisen bestimmte Merkmale, wie separate Glutnester, Brandkanäle, Einsinken des Stapelguts, auf einen biologischen Selbsterhitzungsvorgang hin.

Die Untersuchungsmöglichkeiten, die sehr stark von einer fachgerechten und sorgfältigen Probenahme abhängen, beruhen auf der Auswertung der o. a. morphologischen und mikrobiologischen Veränderungen. Mit den naturwissenschaftlichen Methoden kann grundsätzlich nur eine biologisch bedingte Selbsterhitzung nachgewiesen werden, nicht aber, dass diese auch tatsächlich zu einer SE geführt hat.

5.3.5 Infrarot – Thermographie

Wie bereits im Kapitel 5.3.3.1 angeführt, wird die Infrarotstrahlung des elektromagnetischen Spektrums auch als Wärmestrahlung bezeichnet, da sie auf der Haut als Wärme empfunden wird. Die messtechnische Erfassung dieser Wärmestrahlung kann zur Abbildung von Objekten oder auch zur Temperaturmessung verwendet werden. Diese *Infrarot-Thermographie* ist kein analytisches Verfahren wie die Infrarot-Spektroskopie, aber eine Untersuchungsmethode, die im vielschichtigen Bereich der Brandursachenfeststellung zahlreiche Anwendungsmöglichkeiten bietet.

Die Abbildung von Objekten aufgrund ihrer Wärmeabgabe wird als *Thermographie* („Herstellung eines Wärmebildes“) bezeichnet. Die Definition des Dudens lautet:

„Verfahren zur fotografischen Aufnahme von Objekten mittels ihrer an verschiedenen Stellen unterschiedlichen Wärmestrahlung“.

Die Aufnahmegeräte sind *Wärmebildkameras* oder *Infrarotkameras*, das Wärmebild wird auch *Thermogramm* genannt. Die folgende Abbildung zeigt mittels verschiedener Graustufen die mit einer IR-Kamera aufgenommenen Temperaturbereiche eines glimmenden Holzklotzes:

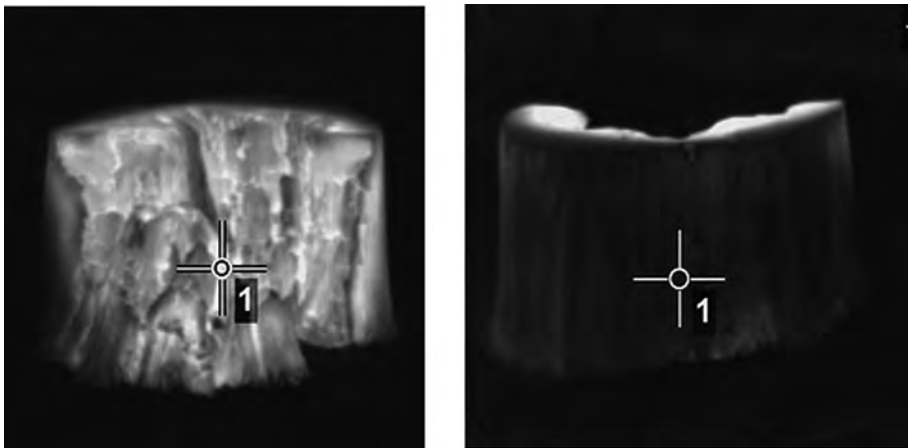


Abb. 21: Vorder- und Rückseite eines glimmenden Holzklotzes

Die Intensität der von einem Objekt emittierten Strahlung ist vor allem abhängig von der Objekttemperatur: je höher die Temperatur, desto stärker ist die Strahlung. Der besonders wirksame Teil dieser Wärmestrahlung, das so genannte *Thermische Infrarot*, umfasst den Wellenlängenbereich von $0,78 \mu\text{m}$ bis etwa $14 \mu\text{m}$, also das nahe Infrarot (*NIR*) und einen Teil des mittleren Infrarot (*MIR*) des elektromagnetischen Spektrums (s. S.52). Die in den Kamerasystemen verwendbaren Detektoren haben unterschiedliche Ansprechbereiche, so dass ein für den jeweiligen Anwendungsbereich optimaler Detektor einzusetzen ist. Ebenso muss ein geeignetes Linsensystem gewählt werden und der

passende Messbereich sowie der material- und temperaturabhängige Emissionsgrad eingestellt werden.

Die Anwendungsmöglichkeiten der Infrarotthermographie bei Verwendung hochwertiger Infrarot-Kameras und entsprechender Berücksichtigung der zugrunde liegenden strahlungsphysikalischen Gesetze sind derzeit:

- die berührungslose Temperaturmessung an spannungsführenden, sehr heißen und unzugänglichen Objekten; das Messobjekt oder die zu beobachtenden Prozesse werden nicht beeinflusst,
- schnelle Abbildungen mit bis zu 50 Bildern pro Sekunde im Echtzeitsystem,
- flächenhafte Temperaturinformationen über Wärmebilder,
- hohe Genauigkeit bei Temperaturmessungen (bis etwa ± 1 °C) und Reproduzierbarkeit (bis etwa $\pm 0,5$ °C),
- hohe Temporauflösung (bis unter 0,1 °C).

Auch bei der Untersuchung von Bränden bzw. Brandursachen bestehen zahlreiche Einsatzmöglichkeiten für die Infrarot-Thermographie. Als beispielhafte Auswahl können genannt werden:

- Lokalisierung von heißen Stellen an Kachel- oder Saunaöfen,
- Anzeige von Restwärmeprofilen an Brandobjekten,
- Sichtbarmachung von Wärmeströmungsvorgängen an Lüftungsöffnungen (z. B. Temperaturunterschiede an Fenstern),
- zerstörungsfreie Untersuchung von Elektroheizgeräten
- Auffinden von lokalen Überhitzungsstellen in Elektroanlagen.

Die folgende Abbildung zeigt die Wärmebilder einer intakten und einer defekten Heizdecke.

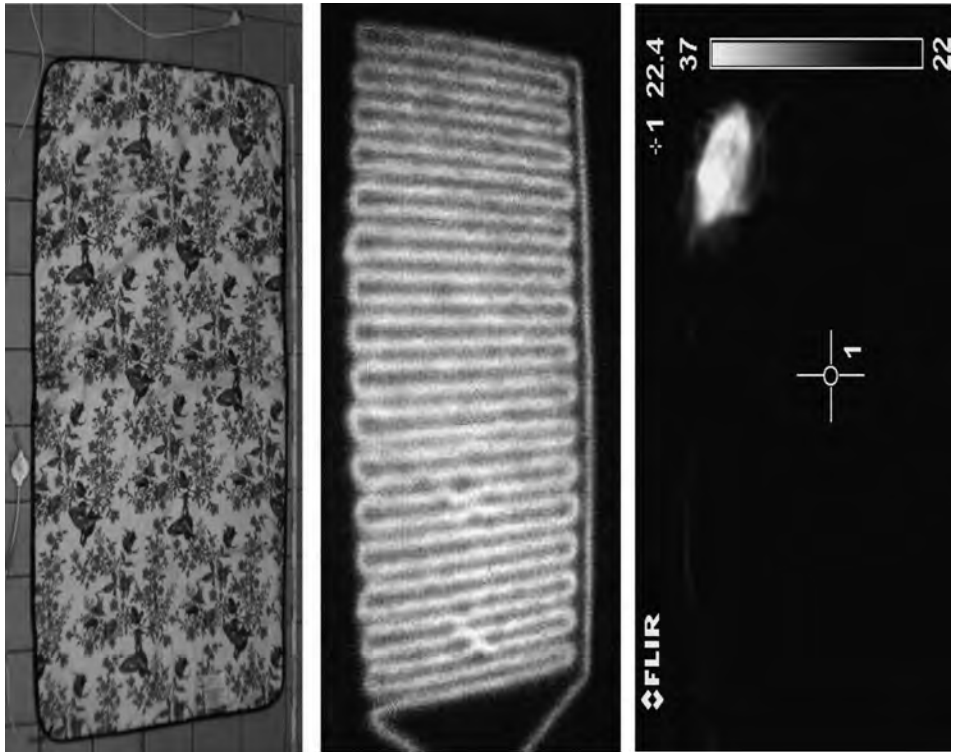


Abb. 22: Digitalbild sowie Infrarotaufnahmen einer intakten (Mitte) und einer defekten Heizdecke (rechts), bei der nahezu alle Heizdrähte ein Knäuel gebildet haben.

Die Anwendungsmöglichkeiten zeigen, dass die Infrarot-Thermographie mit der Wärmebildkamera die Arbeit der Feuerwehren und der Brandursachenermittler vielfältig unterstützen kann. In vielen Fällen ist allein durch Betrachtung des Wärmebildes z. B. die Ortung von Glutnestern oder auch von Personen möglich. Für Anwendungen als Temperaturmessgerät müssen aber die der Infrarottechnik zugrunde liegenden physikalischen Gesetzmäßigkeiten berücksichtigt werden.

Literatur

Bertsch, W., Holzer, G., Sellers, C. S.: Chemical Analysis for the Arson Investigator and Attorney, Hüthig Verlag, 1993

Bertsch, W., Ren, Q.: Contemporary Sample Preparation Methods for the Detection of Ignitable Liquids in Suspect Arson Cases, Forensic Science Review, Vol. 11, 1999

Bertsch, W., Ren, Q.: The chemical analysis of fire debris for potential accelerants in M. J. Bogusz [Ed.]: Forensic Science (Handbook of Analytical Separations, Vol. 2), Elsevier Sci. B. V., 2000

Budzikiewicz, H., Schäfer, M.: Massenspektrometrie – Eine Einführung, Wiley-VCH, Weinheim, 2005,

Daeid, N. N.: Fire Investigation, CRC Press, 2004

DIN 51005, Thermische Analyse [TA] – Begriffe

DIN 51006, Thermische Analyse [TA]; Thermogravimetrie [TG] – Grundlagen

Eppert, G. J.: Flüssigchromatographie, HPLC – Theorie und Praxis, Springer Verlag, 3.Auflage, 1997.

Frontela, L., Pozas, J. A., Picabea, L.: A comparison of extraction and adsorption methods for the recovery of accelerants from arson debris, Forensic Science International, Vol. 75, 1995

Hemminger, W. F., Cammenga H. K.: Methoden der Thermischen Analyse, Springer Verlag, 1989

Hesse, M., Meier, H., Zeeh, B.: Spektroskopische Methoden in der organischen Chemie, G. Thieme Verlag, 1984

Holzer, G., Bertsch, W., Zhang, Q. W.: Design criteria of a gas chromatography-mass spectrometry based expert system for arson analysis, Analytica Chimica Acta, Vol. 259, 1992

Hübschmann, H.-J.: Handbook of GC/MS: Fundamentals and Applications (2. rev. Ed.), Wiley-VCH Verlagsgesellschaft mbH, Weinheim, 2008

Kelly, R. L., Martz, R. M.: Accelerant identification in fire debris by GC/MS – Techniques, Journal of Forensic Sciences, Vol. 29(3), 1984

Leibniz, E., Struppe, H.-G.: Handbuch der Gaschromatographie, Akademische Verlagsgesellschaft Geest & Portig KG, Leipzig, 1984

Naumer, H. [Hrsg.], Adelhelm, M. [Mitverf.]: Untersuchungsmethoden in der Chemie: Einführung in die moderne Analytik, Thieme-Verlag, 1990 (2. Aufl.)

Redsicker, D. R., O'Connor; J. J.: Practical Fire and Arson Investigation
2 nd. ed., CRC-Press, London, 1997

ROEMPP: Analytische Verfahren und Grundlagen, Spektroskopische Methoden,
IR-Spektroskopie, Georg Thieme Verlag, 2006, <http://www.roempp.com>

Scheppers-Wercinski, S. A.: Solid Phase Microextraktion, A Practical Guide,
Marcel Dekker, Inc. 1999

Sigma-Aldrich Co., Supelco 925 B, SPME Applications Guide, 2001

Schomburg, G.: Gaschromatographie: Grundlagen, Praxis, Kapillartechnik,
Verlag Chemie, Weinheim 1987.

Ullmanns Encyclopädie der technischen Chemie, 4. Auflage, Band 5,

Unger, K. K., Weber, E. A.: A Guide to Practical HPLC, GIT Verlag, 1999

Unger, K. K.: Handbuch der HPLC (Teil 1), Leitfaden für Anfänger und Praktiker,
GIT Verlag, 1989,

Utschik, H., Schultze, D., Böhme, K.: Methoden der thermischen Analyse,
Mitt.bl. Chem. Ges. DDR, Jg. 36, September 1989

Widmann, G., Riesen, R.: Thermoanalyse, Hüthig-Buch-Verlag, 1990

6 Experimentelle Beweisführung und Modellierung

6.1 Brandversuche

Der Brandversuch stellt bei der Bearbeitung von Brand- und Explosionsereignissen eine Möglichkeit dar, aufgestellte Hypothesen zu überprüfen bzw. Fragestellungen zu beantworten. Wo ein rechnerischer Ansatz Schwierigkeiten verursacht oder praktische Erfahrungen fehlen, kann der Brandversuch hilfreich sein. Insbesondere bei einer Bewertung von Zeugen- bzw. Beschuldigtenangaben sollten Kenntnisse auf diesem Gebiet vorliegen.

Bei der Durchführung von Brandversuchen muss eine wiederholbare (reproduzierbare) Vorgehensweise bei allen durchzuführenden Schritten erfolgen. Hierfür gibt es keine vorgegebenen oder festgelegten Handlungsanweisungen, dennoch sollten die nachfolgenden Grundregeln beachtet werden.

Planung von Versuchen

Im Rahmen der Brandursachenfeststellung entstehen oft Fragen über das Zünd- und Brandverhalten von Stoffen, die Art und Wirkung von Zündquellen und/oder zu den Bedingungen der Ausbreitung eines Brandes. Zur Vorbereitung sind alle erreichbaren Informationen über das Brandobjekt, die Handlungen von Personen, technische sowie technologische Gegebenheiten zu nutzen. Außerdem ist zu berücksichtigen ob das Versuchsmaterial authentische oder zumindest ähnliche Eigenschaften besitzt. Für die Durchführung der Versuche ist ein Raum auszuwählen, welcher in der Belüftung und der Rauchabfuhr dem Originalbrandraum ähnlich ist.

Nach Möglichkeit sollten einfache Fragestellungen formuliert werden, da diese leichter, schneller und besser reproduzierbar durch Experimente zu beantworten sind. Für komplexe Fragestellungen sind umfangreiche Vorbetrachtungen notwendig. In vielen Fällen führen worst-case-Versuche schneller zum Ziel.

Zur Absicherung der Ergebnisse sind die Versuche zu wiederholen. Da diese Forderung nur in wenigen Fällen erfüllbar ist, muss bei der Bewertung der Ergebnisse auch der Einfluss geringfügig veränderter Randbedingungen und geringer Substanzmengen Berücksichtigung finden.

Zünd- und Brandverhalten von Stoffen

Das Zünd- und Brandverhalten von Stoffen wird in einfacher Form mit den sicherheitstechnischen Kennzahlen beschrieben. Diese repräsentieren einen anerkannten Wissensstand, deshalb besitzen sie eine große Aussagekraft. Eine Reproduzierbarkeit kann erreicht werden, wenn die Bestimmung der verschiedenen Kennzahlen an eine exakt festgelegte Apparatur und einen genau einzuhaltenden Verfahrensablauf gebunden ist. Die unkritische Anwendung der sicherheitstechnischen Kennzahlen auf ein konkretes

Brandszenario, mit der Ableitung eindeutiger Schlussfolgerungen, birgt die Gefahr von Fehleinschätzungen.

Die sicherheitstechnischen Kennzahlen einer Vielzahl von Stoffen können aus der Literatur (z. B. Sicherheitsdatenblättern) bzw. aus Stoffdatenbanken entnommen werden. Ein Vergleich der Angaben aus mehreren Quellen sollte durchgeführt werden. Die eigenständige Bestimmung bzw. nochmalige Bestätigung der Literaturwerte kann auf Ausnahmen beschränkt bleiben. Liegt ein Gemisch verschiedener Stoffe vor, ist eine Mittelwertbildung der Kennzahlen der Einzelkomponenten unzulässig.

Sollte dennoch eine eigenständige Bestimmung sicherheitstechnischer Kennzahlen erfolgen, bedarf es einer genormten Apparatur und der Einhaltung der entsprechenden Untersuchungsmethode. Abweichungen von der Norm bzw. Schaffung eigener Apparaturen und Abläufe kann in bestimmten Fällen durchaus sinnvoll sein. Die ermittelten Werte müssen bei ihrer Benutzung unbedingt Hinweise zur veränderten Methode enthalten. Die Abweichungen sind zu dokumentieren und zu begründen.

Liegt ein Gemisch von unterschiedlichen Einzelkomponenten vor, so sind Literaturangaben hierzu zu prüfen, da ansonsten die eigenständige Bestimmung der Kennzahlen durchzuführen ist. Dabei sollte vor der Durchführung des Experimentes bzw. Zündversuches Klarheit geschaffen werden, ob die Einzelkomponenten in einer homogenen Mischung vorliegen und in dieser auch verbleiben, da sonst die ermittelten Werte nur bedingt aussagekräftig sind.

Die Vielzahl der aktuell vorzufindenden Gegenstände und Materialien macht es unmöglich, ihr Verhalten bei einer thermischen Einwirkung jederzeit zu kennen. Der einfachste Versuch, hinsichtlich der Bestimmung der Leichtentflammbarkeit besteht darin, eine kleine Substanzprobe mit einer Zündholz- bzw. Feuerzeugflamme nur 10 Sekunden zu beaufschlagen und das eigenständige Weiterbrennen zu beobachten. Die Tatsache, dass ein Gegenstand bzw. eine Substanz bei einem Schadenfeuer mit vernichtet wurde, sagt noch nichts über das Zündverhalten aus.

Ein wesentliches Ziel von Brandversuchen besteht darin, zu prüfen, ob eine Zündquelle in einer konkreten Situation auch die Brandentstehung eingeleitet hat. Zündquellen besitzen sehr unterschiedliche Energieinhalte, so dass mit dem Nachweis einer Zündquelle noch keine sichere Aussage über die wirkliche Brandursache getroffen werden kann. Auch Hinweise in Sicherheitsdatenblättern oder anderen verfügbaren Informationen über das Zünd- und Brandverhalten von Materialien können nicht als Nachweis bei einer konkreten Brandentstehung angesehen werden.

Einflussfaktoren auf Brandentstehung und -entwicklung

Der Zünderfolg bei Anwesenheit einer konkreten Zündquelle und bei Vorhandensein eines brennbaren Systems erscheint nahe liegend, beantwortet aber nicht die Frage, wie es zum räumlich-zeitlichen Aufeinandertreffen kommen konnte. In ähnlicher Weise besteht oft Unklarheit, warum aus einem begrenzten Anfangsbrand ein vernichtendes Brandereignis werden konnte.

Die Beantwortung derartiger Fragestellungen bedarf einer möglichst genauen Kenntnis aller ereignisbezogenen Randbedingungen bzw. spezieller Einflussfaktoren. Diese Informationen können z. B. über die Brandortarbeit, die Zeugen- bzw. Beschuldigtenvernehmungen und die Einsichtnahme in Unterlagen erlangt werden. Um diese beim Brandversuch zu berücksichtigen, ist vorher ihre Zuverlässigkeit zu bewerten.

Zielstellung von Brandversuchen

Liegen Informationen über eine konkrete Ausgangssituation vor, kann der Brandversuch belegen, dass der angenommene Ablauf auch stattgefunden hat. Umgekehrt kann auch festgestellt werden, dass eine zugegebene oder beschriebene Brandentstehung nicht möglich war. In gleicher Weise lassen sich Phänomene der Brandübertragung und -ausbreitung verifizieren bzw. widerlegen.

Vorbereitung

Obwohl der Sauerstoff als Bestandteil der Umgebungsluft in ausreichender Menge zur Verfügung steht (21 Vol.-%), muss vor Beginn der Versuchsdurchführung geklärt werden, ob im konkreten Fall zeitlich oder räumlich ein Sauerstoffmangel vorlag.

Der Beschaffung und Auswahl der brennbaren Stoffe muss eine sehr große Aufmerksamkeit zukommen. In den wenigsten Fällen wird der Brandversuch mit einer einzigen chemischen Verbindung durchgeführt. Meist bestimmen Gebrauchsgegenstände, Möbel, Maschinen, komplex aufgebaute Materialien und Bauteile das brennbare System. Für derartige Gegenstände kann es sehr wichtig sein, dass

- Alter und Abnutzungsgrad,
- Verschmutzungen,
- Beschädigungen,
- Reparaturen,
- Zerkleinerungsgrad (Dispersionsgrad)
- Feuchtigkeitsgehalt und
- Ausgangstemperatur

in Erfahrung gebracht werden.

Welche der hier beispielhaft genannten Einflüsse berücksichtigt werden müssen, kann nur fallbezogen entschieden werden.

Sofern die Möglichkeit vorhanden ist, kann der Versuch am Ereignisort durchgeführt werden. Da die vom Brand verursachten Veränderungen, insbesondere die Zerstörung baulicher Gegebenheiten oft nicht rückgängig gemacht werden können, bleibt nur die Durchführung in einem vergleichbaren Objekt. Dabei müssen zwangsläufig Kompromisse eingegangen werden, die aber in der Beurteilung des Versuchsergebnisses zu berücksichtigen sind.

Die Genauigkeit der Versuchsergebnisse hängt von der verfügbaren Gerätetechnik ab. Der notwendige Umfang und die Genauigkeitsanforderungen müssen vor Beginn der Durchführung abgeklärt sein. Als Grundsatz kann hier davon ausgegangen werden, dass nie zu viele Informationen gesammelt werden.

Eine Aussagesicherheit ergibt sich grundsätzlich nur bei Durchführung und Auswertung gleichwertiger Versuche.

Durchführung

Nachdem in der Vorbereitungsphase alle erforderlichen materiellen Voraussetzungen und Daten vorliegen, stellt die Durchführung des Versuches die eigentliche Umsetzung der Zielstellung dar. Es kann auch sinnvoll sein, in Vorversuchen die Ausgangssituation zu vereinfachen und dabei verschiedene Randbedingungen zu prüfen. So sind worst-case-Versuche nicht nur zulässig, sondern vielfach notwendig, um die Zahl der Brandversuche einzugrenzen.

Auswertung

Nach Abschluss der Brandversuche wird deren Auswertung vorgenommen. Dabei wird sichtbar, ob die Zielstellung erreicht wurde.

Dabei sind Fehlerbetrachtungen anzustellen und es ist die Reproduzierbarkeit zu überprüfen. Liegen erhebliche Abweichungen in den Einzelergebnissen vor, sind mögliche Fehlerquellen zu suchen.

Die Auswertung muss daher von gesicherten und auch für jeden Betrachter erkennbaren Fakten ausgehen. Die Ergebnisse sind einer kritischen Prüfung zu unterziehen. Der Vergleich der Ergebnisse mit publizierten Daten sollte vorgenommen werden. Abweichungen sind zu diskutieren. Bei der Bewertung ist Vorsicht geboten, wenn die Anzahl der Versuche beschränkt war.

6.2 Rekonstruktion

Die Rekonstruktion stellt eine Wiederherstellung oder Nachbildung des ursprünglichen Zustandes bzw. der maßgeblichen Umstände dar. Im Rahmen der Brandortarbeit werden durch Rekonstruktionen wichtige Informationen beschafft, welche beweis erhebliche Tatsachen darstellen können. Außerdem kann die Bewertung der Spurenbilder in ihrer Gesamtheit eine Rekonstruktion notwendig machen.

Beim Löscheinsatz der Feuerwehren werden oft Veränderungen in den Brandobjekten vorgenommen. Diese rückgängig zu machen stellt bereits eine Form der Rekonstruktion dar. Allerdings sollte man sich dabei bewusst sein, dass dieser ursprüngliche Zustand bereits Veränderungen durch die Brandeinwirkungen beinhaltet. Mitunter reicht es auch aus, nur einen kleinen Teil des Brandobjektes in eine Rekonstruktion einzubeziehen.

Der Zusammenhang der Rekonstruktion mit dem Experiment ergibt sich daraus, dass einerseits die Rekonstruktion oft eine Vorbedingung für die korrekte Durchführung eines Experimentes darstellt, andererseits das Experiment selbst zur Rekonstruktion eines Zustandes oder Ereignisablaufes führen kann.

Bei Rekonstruktionen am Brandort haben die Parteien im Zivilverfahren ein Anwesenheitsrecht, weil es sich um eine besondere Art von Ortsbesichtigung handelt.

6.3 Modellierung von Prozessen und Abläufen

Bei der Durchführung von Rekonstruktionen bzw. Experimenten steht die Forderung, äquivalente Bedingungen im Verhältnis zum ursprünglichen Prozess oder Objekt zu schaffen. Dies lässt sich in vielen Fällen nicht erfüllen, da der Aufwand in einem nicht vertretbaren Verhältnis zu den Ergebnissen steht. Außerdem können die Ergebnisse aus einem einzigen Versuch nicht zu einer Verallgemeinerung genutzt werden. Dazu bedarf es einer größeren Anzahl von durchgeführten Versuchen, die aus verschiedensten Gründen meist nicht zu realisieren sind.

In dieser Situation bestehen mehrere Möglichkeiten zur Lösung des Problems. Die als wesentlich erachteten Möglichkeiten sind die Durchführung von Modellbrandversuchen und die Verwendung mathematischer Modelle.

Der Gedanke, an einem Brandobjekt in verkleinertem Maßstab Brandversuche durchzuführen, erscheint sehr verlockend. Damit könnten der Aufwand und mögliche Kosten gering gehalten werden, die Anzahl der Versuche erhöht und die Reproduzierbarkeit verbessert werden. Diesen Vorteilen stehen jedoch auch einige Probleme gegenüber. Bei einer Verkleinerung der Versuchsaufbauten ist eine Reihe von Ähnlichkeiten zu berücksichtigen.

Dazu zählen u. a. die geometrische, mechanische, thermische und chemische Ähnlichkeit. Sie gilt als gegeben, wenn die Kennzahlen der Modellbrandversuche übereinstimmen. Einige der bekanntesten Kennzahlen sind:

$$\text{Froude-Zahl } Fr = \frac{\text{Trägheitskraft}}{\text{Schwerkraft}}$$

$$\text{Nusselt – Zahl } Nu = \frac{\text{gesamte übertragene Wärmemenge}}{\text{durch Leitung übertragene Wärmemenge}}$$

Da die Bestimmung und Einhaltung dieser Kennzahlen ebenfalls nicht unproblematisch ist, werden entweder sehr einfache Modelle verwandt oder die Versuche doch im Maßstab 1:1 durchgeführt.

Die Bemühungen, die komplexen Abläufe eines Brandes in mathematischen Modellen zu erfassen, bestehen bereits seit vielen Jahren. Dabei wurden neben ingenieurmäßigen Verfahren verschiedene Einraummodelle, Zonenmodelle und Feldmodelle entwickelt.

In der Anfangsphase der Modellentwicklung kamen zunächst Einzonen-, später auch Mehrzonenmodelle zur Anwendung. Diese lieferten unter bestimmten Bedingungen brauchbare Aussagen über Mittelwerte der Temperatur im Raum bzw. in der Heißgasschicht oder über die mittlere Dicke der Rauchgasschicht. Da diese Modelle jedoch die Energie- und Massenerhaltung nur auf globaler Ebene berücksichtigen und Impulseffekte gänzlich vernachlässigen, benötigen sie insbesondere zur Beschreibung dynamischer Phänomene zusätzliche empirische Relationen. Sie sind daher durch die implizit in ihrem Ansatz enthaltenen Näherungen und durch den Gültigkeitsbereich der eingesetzten empirischen Beziehungen in ihrer Anwendungsmöglichkeit eingeschränkt. Außerdem erlauben sie keine lokalen Aussagen zur Temperatur- und Druckverteilung oder zu den Strömungsverhältnissen im Raum. Daher wurden schon Anfang der siebziger Jahre erste Feldmodelle (dreidimensionale numerische Strömungssimulation CFD: Computational Fluid Dynamics) entwickelt, die nicht diesen vorgenannten Einschränkungen unterworfen sind.

Zur Simulation von Raumbränden stehen derzeit verschiedene Feldmodelle zur Verfügung. Sie basieren auf der Lösung der lokalen, zeitabhängigen hydrodynamischen Erhaltungsgleichungen in drei Raumdimensionen. Dieses Verfahren hat gegenüber von Zonenmodellen den Vorteil, dass es für ein gegebenes Szenarium die für den Brandverlauf und die Brandwirkung so wesentliche Konvektionsströmung konsistent zu den vorgegebenen Randbedingungen ortsabhängig berechnet. Die Anwendung solcher Programme auf ein konkretes Brandereignis verlangt die Beschaffung einer großen Anzahl von Daten. Von der Exaktheit dieser Daten hängt das Ergebnis der Rechnungen ab.

Insbesondere die Verfügbarkeit von leistungsfähigen Personalcomputern führte zu der Hoffnung, Brandentstehungen und -verläufe simulieren zu können. Die Ergebnisse dieser Bemühungen sind teilweise beachtenswert. Es gilt aber auch in diesem Fall, dass bei komplexen Ausgangssituationen Vereinfachungen vorgenommen werden müssen. Damit wird eine zusätzliche Bewertung der Brauchbarkeit der Ergebnisse notwendig. Die Ergebnisse können eine Brandortbesichtigung und eine Bewertung der Individualspuren nicht ersetzen.

Der ingenieurmäßige Einsatz der CFD-Simulationen erfolgt gerade im vorbeugenden Brandschutz vermehrt und mit Erfolg; die unkritische Anwendung zur Klärung von Fragen zu Entstehungs- oder Anfangsbränden ist sehr problematisch und sollte Experten vorbehalten sein, die auch die Parameterempfindlichkeit und die Grenzen des Verfahrens abschätzen können. Hier ist noch erhebliche Forschungsarbeit zu leisten, um die Ergebnisse gerichtsverwertbar zu machen.

Literatur

Bayerlein, W.: Praxishandbuch Sachverständigenrecht, Beck Juristischer Verlag; Auflage: 3., vollst. überarb. A. (2008)

Blankenhorn, C.: Die Neuregelung der Haftung des gerichtlichen Sachverständigen
Dissertation Universität Regensburg, 2004

Frei-Sulzer, M., Suter, A.: Leitfaden zur Bearbeitung von Bränden und Explosionen,
Kriminalistik-Verlag, Hamburg, 1971

Hosser, D. (Hrsg): Leitfaden – Ingenieurmethoden des Brandschutzes, Technischer
Bericht – vfdb, 2. Auflage Mai 2009

Kriminalistik Kleine Fachbuchreihe 4/3, Die Suche und Sicherung von Spuren, Teil III,
Brände und Havarien, Publikationsabteilung des Ministerium des Innern der DDR, Berlin,
1974

Schulze, H.-J.: Anwendung der Ähnlichkeitstheorie bei Brandrekonstruktionen und
Untersuchungsexperimenten im Rahmen der Ermittlung der Entstehungsursachen von
Bränden, Brandschutz Explosionsschutz – Aus Forschung und Praxis, Staatsverlag der
DDR, Berlin (1989) 20, S.11 – 27

7 Gutachten zu Brandursachen

Die Erstellung eines Gutachtens obliegt einem Sachverständigen für Brandursachen. Dieser sollte bei seinem Tätigwerden eine Reihe von Grundsätzen einhalten.

Im Folgenden werden einige wichtige Grundlagen für Brandsachverständige dargestellt. Sie erheben keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Der jeweilige Auftrag und die konkrete Ausgangssituation beeinflussen die Herangehensweise entscheidend.

Bei der Betrachtung der Person des Sachverständigen geht es in erster Linie um einen gerichtlichen Sachverständigen. Die gewissenhafte Gutachtenserstellung verlangt von allen Sachverständigen gleichermaßen die Einhaltung bestimmter Standards und Richtlinien.

Die Erwartungen die an einen Sachverständigen gestellt werden, sind höher als die bloße Verfügbarkeit über eine gewisse Fachkenntnis. Ein Sachverständiger soll sich als Spezialist auf einem eng definierten Sachgebiet erweisen, dessen Kenntnisstand, Fähigkeiten und Erfahrungen das durchschnittliche Können und Wissen übertrifft.

„Neben den für alle Sachverständigen gültigen Grundsätzen (siehe Punkt 8.1) werden ergänzend einige speziell in Richtung Brandsachverständiger orientierte Hinweise gegeben.“

Besteht bei einem Brand der Verdacht einer strafbaren Handlung und die Brandursache ist nicht offenkundig, wird oft ein Sachverständiger mit der Klärung des Brandereignisses beauftragt. Dabei erforderlich ist eine genaue und umfangreiche Untersuchung der Brandstelle. Wurden bei einem Brand Personen geschädigt oder ein sehr großer Schaden verursacht, sollte die Hinzuziehung eines Sachverständigen unbedingt erfolgen. Der Sachverständige stellt bei der Untersuchung der Brandstelle die Brandausbruchsstelle fest. Die Kriterien zur Festlegung des primären Brandherdes sollten auch für Laien nachvollziehbar und erkennbar sein. Bei der Klärung der Ursachen für die Brandentstehung wird das Eliminationsverfahren (Ausschlussverfahren) angewendet. Es werden alle eventuell in Frage kommenden Zündquellen bzw. Zündmechanismen erörtert und die unwahrscheinlichen ausgeschlossen. Sind ausreichend viele Informationen vorhanden bzw. können diese beschafft werden, sollte sich die Zündquelle herauskristalisieren, welche den Brand verursacht hat. In vielen Fällen muss aber mit der Eingrenzung auf mehr als eine Zündquelle gerechnet werden. Wurde an der Brandstelle jedoch unzureichend gearbeitet, sind die primären Interpretationen des Spurenbildes zweifelhaft oder sogar eindeutig falsch, ist eine nachträgliche Rekonstruktion des tatsächlichen Ablaufs oft nicht mehr möglich oder führt im ungünstigsten Fall sogar zu fehlerhaften Urteilen.

Eine weitere Form der Tätigkeit ist die Erstellung von Gutachten zu sog. Organisationsverschulden. Dabei gilt es festzustellen, ob brandschutztechnische Mängel für die Brandfolgen mit verantwortlich sind und eventuell Personen durch die Verletzung von Sicherheitsmaßnahmen den Brandausbruch verursacht bzw. begünstigt haben. Bei der Bearbeitung derartiger Schadensfälle können Kenntnisse aus unterschiedlichsten Gebieten notwendig sein.

Unter Umständen kann es notwendig werden, dass ein bereits vorliegendes Gutachten auf Veranlassung der Verteidigung, Staatsanwaltschaft oder des Gerichts auf bestimmte Fragestellungen hin zu überprüfen ist. Dies erfordert meistens Kenntnisse und Erfahrungen in abgegrenzten Fachbereichen.

Die Ergebnisse der Untersuchungen und die Bewertung aller Tatsachen werden in der Regel in Form eines schriftlichen Gutachtens dargelegt. Es wird nach einer entsprechenden Auftragserteilung durch einen Sachverständigen erstellt. Bei der Bearbeitung von Brandereignissen ist es sehr vorteilhaft, wenn der Sachverständige möglichst frühzeitig in die Bearbeitung einbezogen wird und das Brandobjekt bereits nach dem Löscheinsatz der Feuerwehr in Augenschein nehmen kann.

Für den Aufbau eines Gutachtens gibt es keine vorgeschriebene Form, wobei aber bestimmte Grundsätze der Straf- und Zivilprozessordnungen beachtet werden sollten. Das Gutachten soll einerseits den Stand von Wissenschaft und Technik berücksichtigen und andererseits nicht nur für das Gericht sondern auch für einen Zweitgutachter einsichtig und nachvollziehbar sein. Die von Brandsachverständigen zu lösenden Aufgaben in Gerichtsverfahren sind sehr vielschichtig.

Eine mögliche Gliederung eines Gutachtens wird nachfolgend aufgezeigt:

- 1 Grober Sachverhalt
- 2 Auftrag
- 3 Quellen
- 4 Beschreibung des vermuteten Geschehens und/oder der Ursache und die erhaltenen Aufgaben
- 5 Untersuchungen am Tatort/Brandobjekt
- 6 Untersuchung gesicherter Gegenstände bzw. Spuren
- 7 Beschreibung von Rekonstruktionen und Versuchen
- 8 Bewertung
- 9 Zusammenfassung, Beantwortung der Beweisfragen
- 10 Anhang

Der Umfang und Inhalt der nachfolgenden Punkte richtet sich stark nach Besonderheiten des konkreten Brandobjektes. Bei der Bearbeitung ist grundsätzlich nach Anknüpfungs- und Befundtatsachen zu trennen. Im Zivilprozess muss beachtet werden, dass nur die von den Parteien vorgetragenen Tatsachen eine Rolle spielen und Beweis über Tatsachen wird nur erhoben, wenn der Gegner den Tatsachenvortrag bestreitet. Im Strafprozess dagegen klärt das Gericht alle entscheidungserheblichen Tatsachen auf.

Die Erhebung von Befundtatsachen, beispielsweise bei der Untersuchung des Brandobjektes, erfolgt auf der Grundlage besonderer Fachkunde. Bei vielen Brandereignissen kann nur ein Fachmann das Wesentliche von bedeutungslosen Einzelheiten unterscheiden. Im Gegensatz dazu erfolgt bei den Anknüpfungstatsachen die Beurteilung von Tatsachen auf Grund der Erfahrungssätze des Wissensgebietes. Sie stellen damit die Grundlage der sachkundigen Schlussfolgerungen und Beurteilungen im Gutachten dar.

Als Tatsachenquellen kommen allgemein in Betracht:

- Aktenstudium
- Ortsbesichtigung
- Untersuchungen von Personen
- Untersuchungen von Sachen und Laboranalysen
- Experimente und Rekonstruktionen
- Pläne, Urkunden, Lichtbilder
- Behördenauskünfte
- Befragung von Personen.

Die richtige Tatsachenfeststellung ist die unerlässliche Grundlage eines zutreffenden Gutachtens und damit Voraussetzung für eine gerichtliche Entscheidung. Ein großartiges Gedankengebäude, der neueste Stand wissenschaftlicher Einsichten und die überzeugendsten Schlussfolgerungen sind wertlos, wenn sie nicht den Tatsachenstoff des Prozesses betreffen, auf unsicheren Tatsachenbefund aufbauen oder auf Tatsachen beruhen, die in prozessordnungswidriger Weise beschafft worden sind. Die Erstellung des Gutachtens bezieht sich dabei auf den Wissensstand des Tages. Bei der mündlichen Vertretung des Gutachtens vor Gericht kann es daher wegen modifizierter Anknüpfungstatsachen sogar zur Abänderung der Schlussbewertung kommen.

Sofern bei der Brandentstehung keine Zeugen anwesend waren und sich das Geschehen durch die Untersuchung nicht eindeutig klären ließ, kann ein „wahrscheinlicher Ereignishergang“ beschrieben werden.

Im Anschluss an eine Gutachtenerstattung kann es unter bestimmten Umständen zu einer Haftung des Sachverständigen nach § 839 a BGB kommen. Dabei muss vom Grundsatz her der Schaden einer Partei die Folge einer auf dem Gutachten beruhenden gerichtlichen Entscheidung sein.

Zum Verständnis der Voraussetzungen und Gründe für derartige Fälle sollen als Abschluss einige Darlegungen zu dieser Problematik erfolgen.

Durch den §839 a BGB wird der Gutachter ganz allgemein zum Schadenersatz verpflichtet. Die Neuerung besteht dabei in der Ersatzfähigkeit reiner Vermögensschäden. Der Ersatz von Vermögensschäden wird dabei nicht mehr von der vorangegangenen Verteidigung des Sachverständigen abhängig gemacht.

Anwendung findet der §839 a BGB nur auf den von einem Gericht ernannten Sachverständigen. In erster Linie sind diejenigen Sachverständigen gemeint, die vor staatlichen Gerichten auftreten. Die Tätigkeit eines Sachverständigen für die Staatsanwaltschaft im strafrechtlichen Ermittlungsverfahren fällt ebenfalls darunter.

§ 839 a BGB gewährt nur dann einen Schadenersatz, wenn der gerichtlich beauftragte Sachverständige ein unrichtiges Gutachten erstattet hat. Ein Gutachten ist dann unrichtig, wenn es objektiv fehlerhaft ist. Die Gründe können in einer fehlerhaften Tatsachenfeststellung, einer unzureichenden Darstellung eines Meinungsstandes oder in Fehlern bei den eigenen Schlussfolgerungen des Sachverständigen liegen.

Sind dem Brandsachverständigen die für die Beurteilung maßgeblichen Umstände nicht bekannt und bleiben seine Bemühungen zur Absicherung der Anknüpfungstatsachen erfolglos, so darf er sein Gutachten jedoch auch auf Unterstellungen aufbauen, muss dies aber im Gutachten kenntlich machen. Ist statt einer konkreten Feststellung nur ein Wahrscheinlichkeitsurteil möglich, dann darf der Sachverständige auch nur entsprechende Feststellungen treffen, anstatt den Wahrscheinlichkeitsgrad als richtig anzugeben. Schließt sich der Sachverständige einer von mehreren in seiner Wissenschaft vertretenen Auffassungen an und würde eine andere zu einem abweichenden Ergebnis führen, muss er deutlich darauf hinweisen.

§ 839 a BGB begrenzt den Verschuldensmaßstab eines Gutachters auf Vorsatz und grobe Fahrlässigkeit. Das Verschulden muss sich dabei lediglich auf die Erstattung eines unrichtigen Gutachtens beziehen. Eine Haftung für einfache Fahrlässigkeit kommt auch in Betracht.

Grobe Fahrlässigkeit liegt nach der Rechtsprechung des BGB dann vor, wenn die verkehrserforderliche Sorgfalt in besonders schwerem Maße verletzt wird und schon einfachste ganz nahe liegende Überlegungen nicht angestellt werden, sowie das nicht beachtet wird, was im gegebenen Fall jedem einleuchten müsste.

Der wesentliche Zusammenhang besteht in der Tatsache, dass im Rahmen des gerichtlichen Verfahrens nicht nur ein Gutachten eingeholt wurde, sondern die den Betroffenen schädigende gerichtliche Entscheidung auf dem unrichtigen Gutachten beruht.

In der Urteilsbegründung hat das Gericht darzulegen, ob und wieweit es einem Gutachten Folge leistet. Aus den Entscheidungsgründen zeigt sich im Rahmen der Beweiswürdigung, inwiefern das Urteil auf dem Gutachten beruht. Wird das Urteil hier hingegen auf andere Beweismittel gestützt und das eingeholte Gutachten völlig außer Acht gelassen, so ist die Kausalität zu verneinen und damit auch ein Anspruch aus § 839 a BGB.

Literatur

Bayerlein, W.: Praxishandbuch Sachverständigenrecht, Beck Juristischer Verlag; Auflage: 3., vollst. überarb. A. (2008)

Blankenhorn, C.: Die Neuregelung der Haftung des gerichtlichen Sachverständigen
Dissertation Universität Regensburg, 2004

Frei-Sulzer, M., Suter, A.: Leitfaden zur Bearbeitung von Bränden und Explosionen,
Kriminalistik-Verlag, Hamburg, 1971

Hosser, D. (Hrsg): Leitfaden – Ingenieurmethoden des Brandschutzes, Technischer
Bericht – vfdB, 2. Auflage Mai 2009

Kriminalistik Kleine Fachbuchreihe 4/3, Die Suche und Sicherung von Spuren, Teil III,
Brände und Havarien, Publikationsabteilung des Ministerium des Innern der DDR, Berlin,
1974

Schulze, H.-J.: Anwendung der Ähnlichkeitstheorie bei Brandrekonstruktionen und
Untersuchungsexperimenten im Rahmen der Ermittlung der Entstehungsursachen von
Bränden, Brandschutz Explosionsschutz – Aus Forschung und

Praxis, Staatsverlag der DDR, Berlin (1989) 20, S.11 – 27

8 Qualitätssicherung und -management

Qualitätssicherung (QS) und Qualitätsmanagement (QM) sind mit den Pflichten eines Sachverständigen oder eines Sachverständigenbüros eng verbunden. Ziel dieser Maßnahmen ist die Akkreditierung von Prüf- und Kalibriereinrichtungen (Normentitel), also der Kompetenznachweis aller Labors.

Erfasst werden aber nicht die Untersuchungen an den Ereignis- oder Tatorten. Hierüber wird eine heftige Diskussion geführt, ob diese Arbeiten akkreditierungsfähig sind; die geforderten Verfahrens- und Arbeitsanweisungen könnten die Aktivitäten und die Kreativität behindern. In der neuesten Norm (s. 8.5) ist jedoch eine Regelung für Stellen verbindlich geworden, die Inspektionen durchführen.

8.1 Der Sachverständige und seine Pflichten

8.1.1 Rechtliche Stellung

Um die Brandursache festzustellen, ist häufig die Zuziehung eines Sachverständigen erforderlich. Dieser wird beauftragt, entsprechende Untersuchungen durchzuführen und ein gerichtsverwertbares Gutachten als Beweismittel zu erstatten (s. Abschnitt 7).

Die deutsche Prozessordnung sieht als Beweismittel vor:

- den Zeugen
- den Sachverständigen
- den sachverständigen Zeugen
- den Augenschein
- die Urkunden und Schriftstücke
- die Aussagen der Beschuldigten

Bis auf das letztgenannte Beweismittel werden diese Beweise im Rahmen der Beweisaufnahme in der Hauptverhandlung erbracht. Als persönliches Beweismittel nimmt der Sachverständige eine Sonderrolle ein.

Der Sachverständige wird im Strafverfahren und Zivilverfahren vom Gericht bestellt. Im Vorverfahren oder Zwischenverfahren nach StPO beauftragen Staatsanwaltschaften bzw. Polizeidienststellen den Sachverständigen. Nur diese Bestellungen sind verfahrensrelevant. Alle anderen Auftraggeber können nur einen so genannten Privat-Sachverständigen beauftragen, dessen Anerkennung vor Gericht die Ausnahme ist.

Ein Sachverständiger kann als Behördensachverständige, als öffentlich bestellter und vereidigter Sachverständiger oder als beauftragter Sachverständiger tätig werden. Allen

Sachverständigen sind Pflichten auferlegt, die sich aus den in 8.1.4 zitierten Gerichtsurteilen und den Prozessordnungen ableiten lassen und die kurz gefasst wie folgt erfüllt sein müssen:

- besondere Sachkunde
- Vertrauenswürdigkeit und Weisungsfreiheit
- Zuverlässigkeit
- Objektivität
- Schweigepflicht
- Fortbildungsstreben
- zeitgemäße apparative Ausstattung

8.1.2 Aufgaben des Sachverständigen

Der Sachverständige erstattet mündliche und schriftliche Gutachten unparteiisch und nach bestem Wissen und Gewissen. Er darf sich nicht mit seinem paraten Wissen begnügen, falls dieses unzulänglich ist. Unter bestem Wissen versteht man nicht nur, dass er bestmögliches Wissen abliefern, sondern auch über aktuelle Kenntnis des Literaturstandes verfügt und die Summe dessen, was als gesichertes Kenntnis- und Erfahrungswissen eines bestimmten Gebietes gilt, anbietet. Hierzu sind alle dem Sachverständigen zugänglichen Informationsquellen auszuschöpfen (Bibliotheken, Sammlungen, Normen, Experimente, Internetrecherchen u. a.). Der Sachverständige muss immer selbst entscheiden, was er nach bestem Wissen und Gewissen – ggfs. sogar unter Eid – verantworten kann. Die Vereidigung liegt im Ermessen des Gerichts, kann aber von den Verfahrensbeteiligten auf Antrag erzwungen werden.

Besteht wissenschaftlicher Dissens über eine Erkenntnis, so hat der Sachverständige darauf hinzuweisen und die eigene Methode nachvollziehbar zu begründen.

Der Sachverständige ist wie ein Zeuge ein persönliches Beweismittel und gehört einem Fachgebiet an, aus dem er Erfahrungssätze aufzeigt und auf einen bestimmten Sachverhalt anwendet. Er kann auch auf Grund seiner besonderen Sachkunde oder technischen und analytischen Möglichkeiten entscheidungserhebliche Tatsachen feststellen. Der Sachverständige hat Beraterfunktion. Schon in den Motiven zur Strafprozessordnung 1873 und zur Zivilprozessordnung 1874 wird er als Gehilfe des Richters bezeichnet; er unterstützt das Gericht auf einem besonderen Fachgebiet. Er ist im Gegensatz zum Zeugen auswechselbar. Unter bestimmten Umständen, wie z. B. bei Besorgnis der Befangenheit oder der fehlenden Unabhängigkeit, kann der Sachverständige wie der Richter abgelehnt werden. Dabei kommt es weder darauf an, ob der Sachverständige tatsächlich voreingenommen, also befangen begutachtet, noch dass nach der Auffassung des Gerichts objektiv ein Misstrauen gegen die Unparteilichkeit gerechtfertigt ist, sondern ob es aus der subjektiven Sicht des ablehnenden Prozessbeteiligten gerechtfertigt erscheint. Beispielsweise ist die Besorgnis der Befangenheit bei Geschäftsbeziehungen, bei Feindschaft, wirtschaftlicher Konkurrenz, missachtenden Bemerkung und Ges-

ten, privater Begutachtung, Mitfahrt bei einem Prozessbeteiligten, Polemik oder Mienenspiel anzunehmen. Der subjektiven Sicht ist aber das Regulativ die objektivierende Forderung „bei verständiger Würdigung“ beigegeben. Misstrauen rechtfertigt sich also nur nach dem Beurteilungsmaßstab eines vernünftigen Menschen. Der Sachverständige kann vereidigt werden.

Sachverständige können nach der Zivilprozessordnung die Erstattung eines Gutachtens unter bestimmten Voraussetzungen verweigern und das Gericht kann ihn von der Verpflichtung zur Erstattung des Gutachtens entbinden. Wie beim Zeugen gibt es auch ein Zeugnisverweigerungsrecht.

Der Sachverständige kann auch als sachverständiger Zeuge bzw. als Zeuge gehört werden, wenn er die Wahrnehmung von Tatsachen mit besonderer Sachkunde bzw. eine persönliche Wahrnehmung über einen vor seiner Vernehmung liegenden Vorgang bekundet. In beiden Fällen ist die Person nicht ersetzbar, da er über Beweistatsachen berichtet. Er hat sich der reinen Werturteile und Meinungen zu verschließen. Er muss die Wahrheit sagen. Er kann nicht abgelehnt werden.

Als Sachverständige können alle Personen ernannt werden, die über eine besondere Sachkunde verfügen. Eine besondere Stellung nehmen die von den Industrie- und Handelskammern öffentlich bestellten und vereidigten (öbuv) Sachverständigen ein. Im Strafverfahren sind Gutachten von Behörden allgemein gesetzlich vorgesehen; sie können auch verlesen werden.

8.1.3 Sachverständigengutachten

Bei der Beantwortung von Beweisfragen ist der Sachverständige gefordert, den Sachbeweis zu betreiben. Dazu muss er häufig vor Ort eigenständige Untersuchungen durchführen. Ausgangspunkt seiner Untersuchungen ist der Auftrag, oder die

Sachverständigenfrage

die gestellt werden muss. Ist der Ansatz des Auftraggebers (Polizei, Gericht, Versicherung, Firmen, Privatpersonen) aus der Sicht des Sachverständigen falsch oder unzureichend (zu eng, zu weit), so hat er auf die richtige Fragestellung hinzuwirken. Die Abänderung muss aber durch den Fragesteller bestätigt werden, weil bei eigenmächtiger Abänderung des Auftrags z. B. die Befangenheit greifen könnte oder auch die Kostenerstattung problematisch werden kann. Bei Unsicherheiten bei einem polizeilichen Auftrag ist in der Regel der Staatsanwalt und bei einem gerichtlichen Auftrag immer der Richter der Ansprechpartner.

Der Sachverständige hat alle auftragsrelevanten

Anknüpfungstatsachen

zu beschaffen, die auch als Basistatsachen bezeichnet werden. Er hat diese immer anzugeben, um den Verfahrensbeteiligten die Beurteilung zu ermöglichen, ob von einem

gesicherten Sachverhalt ausgegangen worden ist. Hierzu zählen Dokumente, Akten, Tatort- und Materialbeschreibungen, Benennung der Beweisgegenstände und deren Zustand, Angaben zu Funktionstüchtigkeit u. ä. Zur Feststellung aller Anknüpfungstatsachen trifft den Sachverständigen eine begrenzte Aufklärungspflicht. Häufig kann er auf Grund seiner besonderen Sachkunde beurteilen, ob diese Tatsachen richtig sind. Das kann und muss im Einzelfall auch eine Material- oder Tatortkritik beinhalten.

Daneben gibt es auch noch die

Zusatztatsachen

die der Sachverständige wahrgenommen hat, aber ohne dass es zu ihrer Aufnahme einer besonderen Sachkunde bedurft hätte. Diese Zusatztatsachen hätten z. B. die Strafverfolgungsorgane selbst zuverlässig feststellen können. Die Zusatztatsachen dürfen nicht als Sachverständigenwissen erfragt werden, sondern müssen durch Zeugenvernehmung entweder dessen, von dem der Sachverständige informiert wurde, oder des Sachverständigen selbst den Verfahrensbeteiligten zur Kenntnis gebracht werden.

Mit seinem Fachwissen ermittelt der Sachverständige die

Befundtatsachen

Derartige Tatsachen werden durch das Gutachten zulässig in die Hauptverhandlung eingebracht. Der Sachverständige muss in nachvollziehbarer Weise darlegen, welche Untersuchungsschritte er unternehmen musste, um die Befundtatsachen festzustellen. Dem Gericht und den Verfahrensbeteiligten muss eine Auseinandersetzung mit den gewählten Methoden und Verfahren möglich sein. Sind Befundtatsachen nicht eindeutig, widersprüchlich oder unvollständig, kann eine Eventualaussage nötig sein. Es ist ungenügend, wenn die Frage, wie die Befundtatsachen festgestellt wurden, nicht im Gutachten erschöpfend beantwortet ist. Bilder, Schautafeln, Demonstrationsobjekte und Modelle sind mitunter gut geeignet, komplizierte Sachverhalte zu erläutern. Aus diesem Grund sind Befundtatsachen und Effekte in allen geeigneten Fällen fotografisch zu dokumentieren und dem Gutachten beizufügen. Es muss stets im Auge behalten werden, dass das Gutachten sich selbst erklären muss und auch gegebenenfalls ohne Ladung des behördlichen Sachverständigen in das Verfahren eingeführt werden kann. Ist dargelegt, von welchen Anknüpfungstatsachen ausgegangen, welche Tests und welche Forschungsmittel angewandt wurden, welche Methoden bei anderen Fachleuten üblich sind, warum von diesen Methoden nicht, von jenen aber Gebrauch gemacht wurde, welche Meinungsverschiedenheiten bestehen, empfiehlt sich in allen umfangreichen Tatbestandsaufnahmen eine

Zusammenfassung

der Zusatz- und Befundtatsachen.

Das Gutachten des Sachverständigen wird gekrönt durch den

Befund

oder die Bewertung oder die Diagnose. Die am Ende des Gutachtens gesetzten Schlussfolgerungen müssen eine logische Antwort auf die vom Gericht oder einem anderen Auftraggeber richtig gestellte Sachverständigenfrage sein. Dabei soll die naturwissenschaftliche Wahrscheinlichkeit angegeben werden, mit der dieses oder jenes Ergebnis zutrifft. Hierzu muss der Sachverständige auch ein Minimum von der juristischen Methodenlehre der Kausalität verstehen: Ursächlich wird in der Rechtsprechung ein Ereignis immer dann genannt, wenn es nicht weggedacht oder bei Unterlassung hinzugedacht werden kann, ohne dass der Erfolg entfielen (Äquivalenztheorie). Auch hier ist nochmals eine Zusammenfassung des Befundes, der Bewertung und der Diagnose angeraten, wenn umfangreiche Aussagen zu machen waren.

Das Gutachten ist vom Sachverständigen schließlich mit eigenhändiger

Unterschrift

unter Beifügung des Erstattungsdatums zu versehen.

Die Gutachten der Sachverständigen oder der Behörden hat das Gericht einer selbständigen, eigenverantwortlichen Prüfung zu unterziehen. Hierbei hat das Gericht im Rahmen des Möglichen und Vertretbaren nicht nur die dem Gutachten zugrundegelegten Tatsachen, einschließlich der vom Sachverständigen selbst auf Grund seiner Sachkunde festgestellten Befundtatsachen, auf ihre Richtigkeit, sondern auch die Schlussfolgerungen des Sachverständigen auf ihre Überzeugungskraft zu prüfen.

8.1.4 Fachliteratur, Urteile

Über die Pflichten und die Rechtsstellung des Sachverständigen gibt es umfangreiche Fachliteratur. Dort finden sich auch wichtige Ausführungen zur Haftung des Sachverständigen, auf die hier nicht eingegangen wird. Verwiesen wird auf § 839a BGB, in der die Haftung des gerichtlichen Sachverständigen neu geregelt wurde (siehe 7).

Nachfolgend wird auf interessante Gerichtsurteile hingewiesen, deren Tenor nachfolgend zusammengefasst wird.

Die Bezeichnung Sachverständiger ist gesetzlich nicht geschützt, dennoch kann ein Verstoß gegen das Gesetz gegen den unlauteren Wettbewerb (UWG) vorliegen. Denn fällt die Führung von Berufsbezeichnungen auch generell unter den verfassungsrechtlich geschützten Bereich der freien Berufsausübung, kann dieser durch das wettbewerbsrechtliche Verbot der irreführenden Werbung (§3 UWG) beschränkt werden.

So weckt die Bezeichnung „Sachverständiger für ..“ Erwartung, dass dieser über ein uneingeschränkt fundiertes Fachwissen verfügt, welches er sich nicht nur autodidaktisch, sondern nachprüfbar durch eine entsprechende Berufsausbildung angeeignet hat. Wird jedoch ein vergleichbarer Kenntnis- und Erfahrungsstand erlangt, kann ein Verbot der Berufsbezeichnung „Sachverständiger“ im Einzelfall unverhältnismäßig sein, da eine relevante Irreführung ausscheidet. Dabei kann die erforderliche Kenntnis auch durch Selbstunterricht erlangt werden. (BGH 06.02.1997 AZ: 1 ZR 234/94)

Wer Leistungen von Sachverständigen in Anspruch nimmt, erwartet eine qualifizierte Ausbildung und eine längere Tätigkeit auf dem jeweiligen Gebiet, woraus sich ergibt, dass ausreichend Erfahrungen vorhanden sein müssen, die auf überdurchschnittliche Sachkunde hinweisen.

Bei der Beurteilung dieser Sachkunde ist auf den beruflichen Werdegang des sich als Sachverständiger Bezeichnenden abzustellen. Jedoch genügen weder übliche Erfahrungen einer durchschnittlichen Berufsausübung noch eine umfangreiche beanstandungsfreie Gutachterstätigkeit. (OLG HAMM 13.05.1997 AZ: 4 U 259/96)

Das Publikum erwartet von demjenigen, der sich als Sachverständiger anbietet, dass er jedenfalls die für die ordnungsgemäße Erstattung von Gutachten erforderliche Sachkunde hat, die der eigenen überlegen ist. Auch von einem schlichten Sachverständigen kann uneingeschränkt fundiertes Fach- und Erfahrungswissen verlangt werden. Dieses kann auch durch Selbstunterricht erlangt werden. Hinsichtlich des Nachweises ausreichender Ausbildung und Kenntniserlangung obliegt demjenigen, der sich dafür anbietet, die Darlegungslast.

Aus den Urteilsgründen: Die Tatsache der beanstandungsfreien Erstellung zahlreicher Gutachten besagt als solche nicht viel, denn beanstandungsfrei kann auch etwas bleiben, was falsch ist. (OLG MÜNCHEN 21.01.1999 AZ: 6 U 5415/97)

Die Tatsache, dass ein Privatgutachter nicht öffentlich bestellt und vereidigt ist, ist allein nicht geeignet, dessen Qualifikation in Zweifel zu ziehen, sofern insoweit keine konkrete Bemängelung erfolgt. (LG MÜNCHEN I 21.12.1990 AZ: 34 O 12850/90)

8.1.5 Bestellung der Sachverständigen

Alle Sachverständigenbüros oder -institute haben die Aufgabe, unabhängig und unparteilich einen Sachverhalt zu prüfen und den objektiven Sachbeweis zu liefern. Ihre Tätigkeiten, Rechte und Pflichten sind, wie schon erwähnt im Wesentlichen in den Zivil- und Strafprozessordnungen niedergelegt.

Öffentlich bestellte Sachverständige sind alle Personen, die von einer öffentlich-rechtlichen Institution bestellt und vereidigt wurden (Industrie- und Handelskammern, Handwerkskammern, Landwirtschaftskammern, Bezirksregierungen, u. a.). Öffentlich bestellte und vereidigte Sachverständige (ö.b.u.v.) zeichnen sich durch besondere Sachkunde, Objektivität und Vertrauenswürdigkeit aus. Sie unterliegen der Aufsicht durch die Bestellungskörperschaft.

Der Behördensachverständige ist von einer Behörde bestellt. Er hat umfangreiche Befugnisse. Seine Gutachten können vor Gericht verlesen werden, so dass das persönliche Erscheinen des Sachverständigen unterbleiben kann. Dementsprechend hoch sind die Anforderungen an dessen gutachterliche Äußerung.

Die kriminaltechnischen Sachverständigen der Landeskriminalämter und des Bundeskriminalamtes haben die Aufgabe, die bei der Begehung von Straftaten und Ordnungswidrigkeiten auftretenden Spuren auszuwerten sowie sonstige Untersuchungen oder Prüfungen an Materialien durchzuführen. Sie bedienen sich hierzu wissenschaftlich-technischer Arbeitsweisen. Die Untersuchungsergebnisse werden in der Regel in Gutachten niedergelegt. Diese Sachverständigen unterstützen mit dieser Arbeit die ermittelnden Polizeidienststellen und Staatsanwaltschaften und tragen zur Entscheidungsfindung von Gerichten bei. Diese Sachverständigen sind wie die vom Gericht beauftragten Sachverständigen nach der Prozessordnung „Gehilfen des Gerichts“ und austauschbar.

8.2 Qualitätsanforderungen an Sachverständigenbüros und Labors

An alle Sachverständigen werden über die in Abschnitt 8.1 genannten Pflichten hinaus zunehmend Anforderungen gerichtet, die mit dem Nachweis der Qualifikation und der Qualitätssicherung zu tun haben. Diesem Druck kann kaum ausgewichen werden. Um langfristig Geschäftserfolg und Kundenzufriedenheit zu sichern, muss das Vertrauen der Kunden oder Auftraggeber gewonnen werden.

In vielen Bereichen schafft eine Zertifizierung nach DIN EN ISO 9001:2000, ISO 14001 und anderen Normen und Richtlinien Vertrauen in die Kompetenz und Leistungsfähigkeit des Unternehmens, also auch einer Sachverständigeneinrichtung. Eine alleinige Zertifizierung nach DIN EN ISO 9001 bedeutet jedoch nur eine Sicherung eines definierten Qualitätsniveaus, liefert jedoch keinen Nachweis der fachlichen Kompetenz eines Prüflabors, da diese Normen nicht die speziellen Anforderungen an Prüf- und Kalibrierleistungen erfassen. Qualitätsmanagement zielt dagegen prospektiv auf eine kontinuierliche Qualitätsverbesserung ab.

Weitreichender ist daher eine Akkreditierung nach der international gültigen und anwendbaren Norm

- DIN EN ISO/IEC 17025 04/2000

„Allgemeine Anforderungen an die Kompetenz von Prüf- und Kalibrierlaboratorien“

Entsprechend der Definition in der DIN EN ISO/IEC 17000 ist Akkreditierung die Bestätigung durch eine dritte Seite, die formal darlegt, dass eine Konformitätsbewertungsstelle die Kompetenz besitzt, bestimmte Konformitätsbewertungsaufgaben durchzuführen. Die Akkreditierung dient dem Nachweis der Kompetenz hinsichtlich Prüfmethoden, Ausstattung, Prüfrichtlinien, der Dokumentation der Ergebnisse sowie der Unparteilichkeit der Prüfer bzw. der Sachverständigen. Gleichzeitig ist sichergestellt, dass das Labor nach DIN EN ISO 9001 arbeitet, also ein Qualitätsmanagementsystem betreibt. Die Norm legt die allgemeinen Anforderungen an die Kompetenz für die Durchführung von Prüfungen und/oder Kalibrierungen, einschließlich der Probennahme, fest. Sie bezieht sich auf Prüfungen und Kalibrierungen, die auf der Grundlage von in normativen Dokumenten festgelegten Verfahren, von Verfahren, die nicht in normativen Dokumenten festgelegt sind, und von Verfahren, die in dem Laboratorium entwickelt wurden, durchgeführt werden.

Eine hervorragende Grundlage für die Einführung eines QM-Systems in Prüf- und Kalibrierlaboratorien stellt die erwähnte Norm DIN EN ISO 17025 dar. Diese Norm ist einerseits die Grundlage für die Akkreditierung solcher Dienstleistungsunternehmen, andererseits bietet sie aber auch für unternehmensintern agierende Prüflaboratorien sehr gute Ansatzpunkte für die Einrichtung eines QM-Systems.

Diese internationale Norm ist auf alle Organisationen, die Prüfungen und/oder Kalibrierungen durchführen, anwendbar. Dazu gehören z. B. Laboratorien von Anbietern, von Anwendern und von unabhängigen Dritten sowie Laboratorien, in denen im Rahmen von Inspektionen und Produktzertifizierungen Prüfungen und/oder Kalibrierungen durchgeführt werden. Sie ist auf alle Laboratorien, unabhängig von der Anzahl der Mitarbeiter oder vom Umfang der Tätigkeit anwendbar.

Dadurch kann erreicht werden, dass das Kundenvertrauen und die Arbeitsgüte erhöht und gefestigt werden. Als Kunden sind zu verstehen: private Auftraggeber, Organisationen, Versicherungen, Behörden und Gerichte. Organisationen, die Prüf- und Kalibrierdienstleistungen erbringen, sehen sich zunehmend mit Kundenanforderungen konfrontiert, das Vertrauen in die nachgewiesene geringe Messunsicherheit sowie die Vergleichbarkeit und Reproduzierbarkeit von Messergebnissen auch durch den Nachweis eines wirksamen QM-Systems zu fördern.

Die Akzeptanz von Prüf- und Kalibrierergebnissen zwischen Staaten soll mit der Berücksichtigung dieser Norm verbessert werden. Wenn Laboratorien dieser internationalen Norm entsprechen und von Stellen akkreditiert sind, die gegenseitigen Anerkennungsvereinbarungen mit gleichwertigen Stellen in andere Staaten beigetreten sind, ist auch die länderübergreifende Akzeptanz gesichert. Die Norm betrifft also auch alle Sachverständige, die ihre Gutachten auf Prüf- und Kalibrierergebnisse stützen.

Mit der Akkreditierung soll nicht nur das Vertrauen in die Arbeit der Prüflabors und der kriminaltechnischen Labore weiter gestärkt werden, sondern auch die vorhandene Kompetenz sichtbar dargestellt werden. Die Akkreditierung von forensischen Laboratorien gewinnt national und international immer mehr an Bedeutung, so dass der Nachweis der eigenen Kompetenz erbracht werden muss.

Im Rahmen von Untersuchungsanträgen unterschiedlichster Auftraggeber werden Untersuchungsmaterialien bzw. Prüfgegenstände (ISO 17025) vorgelegt, die aus verschiedensten Bereichen stammen können. Die Aufgabe der Labore der Privatwirtschaft und der Kriminaltechnik ist die Untersuchung vorwiegend materieller Spuren mit dem Ziel, Aufschluss über den Ablauf eines Geschehens bzw. Hinweise auf den Täter, Verursacher oder Verantwortlichen zu geben. Diese so genannten Sachbeweise sind für die polizeiliche Ermittlung ebenso bedeutsam wie für die Beweisführung vor Gericht und die Schadenswiedergutmachung.

Den Laboratorien, die kriminalwissenschaftliche und -technische Untersuchungen durchführen, kommt daher eine ganz besondere Bedeutung zu. Bei diesen Laboratorien kommt es nicht nur auf die Beschreibung und Sicherstellung von Prozessen an, sondern darüber hinaus in besonderem Maße auf die Kompetenz, bestimmte Untersuchungen richtig und objektiv durchführen und bewerten zu können.

8.3 Qualitätspolitik und Instrumente des QM

Zur Durchführung eines QM-Systems bedarf es nach der Norm 17025 der Festlegung einer Qualitätspolitik („quality policy“), in der Zwecke, Ziele und Inhalte definiert sind. In einer Aufbauorganisation sind die Arbeitsbereiche zu strukturieren. Dabei sind die Verantwortlichkeiten und die Arbeitsabläufe zu definieren. Die fachliche Mindestqualifikation für den Einsatzbereich, die Kompetenz, die Fortbildung und die Schulungen des Personals sind nachzuweisen, zu dokumentieren und zu beurteilen.

In einem so genannten QM-Handbuch werden diese Qualitätspolitik und das QM-System beschrieben. Die Qualitätspolitik beschreibt umfassend die Absichten und Zielsetzungen einer Organisation zur Qualität, wie sie durch die oberste Leitung formell ausgedrückt werden (DIN EN ISO 8402). Die DIN ISO 9001 stellt fest, dass die oberste Leitung ihre Qualitätspolitik, ihre Zielsetzungen und ihre Verpflichtung zur Qualität festlegen und dokumentieren muss. Dazu gehören die Verfahrensanweisungen (VA) und die Arbeitsanweisungen (AA), die die gültige Aufbau- und Ablauforganisation des Qualitätsmanagementsystems beschreiben. Die aus der Qualitätspolitik abgeleiteten Grundsätze zur Sicherstellung der geforderten Qualität gelten für alle Mitarbeiter eines Labors.

Neben der Qualitätspolitik und dem QM-System werden dort auch die Anforderungen an die Räume und die Prüfmittel, die Dienstleistungen und die Ausrüstung beschrieben. Zur Gewährleistung einer lückenlosen Nachvollziehbarkeit von Untersuchungen sind Regelungen für die Handhabung des Beweismaterials erforderlich. Einen wesentlichen Teil nehmen die Festlegung der Auswahl und Beschreibung der Prüfverfahren und deren Validierung ein.

Die Eignung eines Prüfverfahrens wird durch die Validierung (von lat. validus: gesund) nachgewiesen. Damit wird durch einen objektiven Nachweis bestätigt, dass ein System die Anforderungen in der Praxis erfüllt. Es ist ein Dokumentationsverfahren zum Erbringen, Aufzeichnen und Interpretieren von Ergebnissen erforderlich, die zeigen, dass ein Verfahren dauerhaft die vorgegebenen Spezifikationen erzeugt. Es sollen also die Rahmenbedingungen für die Anwendung festgelegt werden.

Prüfsysteme oder Einrichtungen (ISO 17025) sind Gegenstände der Probennahme, der Messung und der Prüfung, die bei Untersuchungen verwendet werden und die für das Ergebnis von Bedeutung sind. Hierzu werden gemäß ISO 17025 Prüfverfahren verwendet, die auch als Untersuchungsmethode oder einfach als Methode in gleicher Bedeutung bezeichnet sind. Hierzu werden in Verfahrensanweisungen (VA) für Prüfverfahren – auch Standard Operating Procedure (SOP), Standardarbeitsanweisung oder Methodenbeschreibung genannt – die Beschreibung und Dokumentation eines Prüfverfahrens vorgenommen. Diese sind erforderlich, um die Genauigkeit der gewonnenen Daten zu gewährleisten. Sie beschreiben einen sich wiederholenden Ablauf von Maßnahmen oder Tätigkeiten.

Während in den Verfahrensanweisungen (VA) Teilaspekte des QM-Systems, allgemeine Abläufe und Verfahren als themenübergreifende Richtlinien beschrieben werden, enthalten Arbeitsanweisungen (AA) fachliches und organisatorisches Know-how und geben detaillierte Anweisungen an das Personal als Richtlinie. Hier werden konkrete, präzise

Vorgänge am Arbeitsplatz beschrieben; sie sind deshalb am Arbeitsplatz verfügbar zu halten.

Die QM-Systemdokumentation ist somit in drei Ebenen aufgeteilt. Die obere Ebene stellt das QM-Handbuch dar, der sich als mittlere Ebene die Verfahrensanweisungen unterordnen und denen sich die dritte Ebene der Arbeitsanweisungen anschließen. Handbuch, VAen und AAen sind wichtige Dokumente, die den Sollzustand beschreiben. Sie sind wesentlicher Bestandteil eines QM-Systems und deshalb immer zu aktualisieren.

Dagegen sind Aufzeichnungen Nachweisdokumente, die natürlich nicht verändert werden dürfen. Sie dienen der Dokumentation von Audits, Korrekturmaßnahmen, vorbeugenden Maßnahmen und von Fehlermeldungen bzw. von Verbesserungsvorschlägen. Zu diesen Aufzeichnungen gehören auch Untersuchungsanträge, Formulare, Prüfberichte, Datenaufzeichnungen und Angaben zur Prüftätigkeit.

Schließlich muss das gesamte Management bewertet werden, um die dauerhafte Eignung und Wirksamkeit eines QM-Systems und der Prüftätigkeiten sicherzustellen. Hierzu sind so genannte Audits (von lat. audire: anhören) durchzuführen, die ein wesentliches Instrument des Qualitätsmanagements darstellen. Als Audit werden allgemein Untersuchungsverfahren bezeichnet, die dazu dienen, Prozessabläufe hinsichtlich der Erfüllung von Anforderungen und Richtlinien zu bewerten. Die Audits werden von einem speziell hierfür geschulten externen Auditor durchgeführt. In einem internen Audit-Plan ist das Vorgehen festzulegen. Durch das Audit soll der Nachweis erbracht werden, dass die Tätigkeiten dem geplanten Verfahren entsprechen und das QM-System wirksam ist. Werden Abweichungen festgestellt, sind sie zu dokumentieren und Korrekturmaßnahmen einzuleiten.

Den Audits folgen Korrektur- und Vorbeugungsmaßnahmen sowie die Erarbeitung von Verbesserungen und die Bewertung deren zeitnaher Umsetzung. Die kritische Prüfung des Erfüllungsgrades der Qualitätsziele ist ein wesentlicher Bestandteil der Bewertung. Dabei können auch Ergebnisse von Ringversuchen oder Befragungen der Kunden (Auftraggeber) hilfreich sein.

Die Prozesse der Abwicklung eines Auftrags sind festzulegen. Diese beginnen mit der Erfassung oder Übergabe von Spuren und Beweismitteln, der Entgegennahme der Untersuchungsanträge und der Zuweisung an einen fachlich qualifizierten Sachverständigen. Über die Details der durchgeführten Untersuchungen sind bis zur Erstattung des Untersuchungsberichtes oder eines Gutachtens Protokollnotizen zu fertigen und zu unterzeichnen. Der Abschluss des Auftrags umfasst auch die Festlegung des Verbleibs der Beweismittel.

Qualitätssichernde Kontrollen umfassen alle Maßnahmen zur Erhaltung des definierten Qualitätsstandards. Dabei ist an den Einsatz von Referenzproben, zertifizierten Proben, Standards, statistischen Unterlagen und Literaturdaten zu denken. So können auch Prüfsysteme einer Leistungskontrolle unterzogen werden. Nützlich sind alternative Methoden, Wiederholungsuntersuchungen und Zweitbestimmungen. Das Gegenlesen der Untersuchungsberichte (und Gutachten), zumindest die Plausibilitätsprüfung, stellen eine wichtige qualitätssichernde Maßnahme dar.

Die Korrektur- und Vorbeugungsmaßnahmen sollen zur frühen Erkennung von Fehlerquellen und Abweichungen beitragen. Aufgetretene Fehler oder Mängel sind durch geeignete Maßnahmen zu beheben. Beschwerden und Anregungen der Antragsteller bzw. Kunden ist Rechnung zu tragen.

8.4 Akkreditierungsverfahren

Ziel ist die Akkreditierung des Labors durch eine anerkannte Akkreditierungsstelle (bislang z. B. DACH, AKS, DAP) nach den dort vorliegenden Akkreditierungsrichtlinien. Die Akkreditierung kann auf Prüf- und Untersuchungsarten bezogen werden, wenn bei Anwendung von Standardverfahren die Kompetenz für diese nachgewiesen ist und bei Nicht-Routine-Untersuchungen die Vorgangsweise in Standard-AA beschrieben und durch Vorlage von Nachweisen die Kompetenz erwiesen wird. Dem schließt sich das Begutachtungsverfahren durch den leitenden Begutachter und dem Fachbegutachter an. Nach Prüfung der Dokumente erfolgt eine Überprüfung vor Ort, was in den Begutachtungsbericht einfließt.

Das Akkreditierungsverfahren beinhaltet einen Antrag an die Akkreditierungsstelle, eine Bestätigung des Antrags, ein Vorgespräch und eine Begutachtung.

Im Falle der Akkreditierung von Prüfarten (Geräteverfahren) richtet sich die Begutachtung insbesondere auf

- die organisatorischen Voraussetzungen des Laboratoriums neue bzw. modifizierte Prüfverfahren zu validieren bzw. verifizieren,
- die Qualifikation des Personals und seiner Leiter und deren Weiterbildung,
- die technische Ausstattung
- die Prüfanweisungen
- das QM-System, speziell die Validierungs- bzw. Verifizierungsanweisungen
- die Aufzeichnungen über die durchgeführten Validierungen bzw. Verifizierungen

Die Akkreditierungsstelle stellt die Akkreditierungsurkunde aus. Diese gilt nur für einen bestimmten Zeitraum und verlangt nach einer Reakkreditierung in bestimmten Fristen.

Die Akkreditierung kann ausgesetzt oder sogar entzogen werden, wenn gravierende Abweichungen festgestellt und die Auflagen nicht erfüllt werden.

8.5 Neue Akkreditierungsmaßnahmen ab 01.01.2010 und DIN EN ISO/IEC 17020

Die seit April 2000 gültige Norm DIN EN ISO/IEC 17025 beschreibt die allgemeinen Anforderungen an das QM-System und die Arbeitsweise von Prüf- und Kalibrierlaboratorien (siehe Punkt 8.2). Sie ist international anerkannt und wird von den jeweils nationalen Akkreditierungsstellen als Grundlage für die Begutachtung von Labors angewendet. Sie ersetzt die bis dahin gültigen Normen DIN EN ISO 45001 und ISO-Guide 25.

Basierend auf der Philosophie der Normenreihe ISO 9000 ff. sind Führungs- und Managementanforderungen genauso beschrieben wie die Arbeitsweisen zur Durchführung kompetenter Analysen, von der Kalibrierung der Geräte und der Validierung von Messverfahren bis hin zur Erstellung aussagekräftiger Prüfberichte inklusive einer Interpretation von Ergebnissen.

Das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) hat am 31.08.2006 erstmals einen deutschen Akkreditierungsbeirat berufen. Ziel war, das deutsche Akkreditierungswesen neu zu strukturieren. Die Außenvertretung soll zukünftig vom BMWi übernommen werden.

Hintergrund war die zu erwartende Revision der europäischen Produkt-Gesetzgebung. Die Akkreditierung soll helfen, die Kompetenzen der Prüf-, Inspektions- und Zertifizierungsstellen festzustellen – eine Tätigkeit, die nach Ansicht der Europäischen Kommission und Mitgliedstaaten in der Verantwortung öffentlicher Behörden liegen sollte. Hierzu soll es in jedem Mitgliedsstaat nur eine einzige Akkreditierungsstelle geben.

Die deutsche Akkreditierungslandschaft umfasste über 20 verschiedene Akkreditierungsstellen in verschiedenen Fachgebieten. Mit der neuen Struktur sollte das deutsche System auf eine gesetzliche Regelung vorbereitet werden, die im Einklang mit dem Grundverständnis des europäischen und internationalen Akkreditierungswesens steht (EG Nr. 765/2008). Auf diese Weise soll die internationale Anerkennung der deutschen Akkreditierung, der akkreditierten Prüf-, Kalibrier-, Inspektions- und Zertifizierungsstellen und nicht zuletzt auch der geprüften Produkte sichergestellt werden.

Eine deutsche übergeordnete Akkreditierungsstelle sollte am besten privatrechtlich organisiert werden. Um die notwendige Anbindung an den Staat zu gewährleisten, erschien eine Beleihung der Stelle mit den Aufgaben der Akkreditierung als sinnvoll.

Laut EU-Verordnung mussten ab dem 1. Januar 2010 alle Mitgliedsstaaten eine einzige nationale Akkreditierungsstelle benennen. Dieser Aufforderung folgend wurde in Deutschland die

Deutsche Akkreditierungsstelle (DAkKS)

errichtet. Die DAkKS arbeitet nicht gewinnorientiert. Gesellschafter der GmbH sind die Bundesrepublik Deutschland und die durch den Bundesverband der Deutschen Industrie e. V. (BDI) vertretene Wirtschaft. Die Beteiligung der Bundesländer ist in Vorbereitung.

Um ihre hoheitlichen Akkreditierungsaufgaben ausfüllen zu können, wurde die DAkKS vom Bund beliehen. Als beliehene Stelle untersteht die DAkKS der Fach-, Rechts- und Finanzaufsicht der zuständigen Bundesministerien. Die Aufsicht ist derart ausgestaltet, dass Unabhängigkeit und Unparteilichkeit bei Akkreditierungsentscheidungen gewahrt bleiben.

Bei ihrer hoheitlichen Akkreditierungstätigkeit wendet die DAkKS das deutsche Verwaltungsrecht an.

Die Überwachungspflichten für Akkreditierungen, die vor dem 1. Januar 2010 erteilt wurden, gingen auf die DAkKS über. Dies bedeutet, dass unabhängig davon, von welcher der bisherigen Akkreditierungsstellen die Akkreditierung erteilt wurde, nunmehr die DAkKS für die weitere Überwachung zuständig ist.

In diese DAkKS GmbH wurden die bisherigen EA-Mitglieder DGA (ehemals DACH, DAP und TGA/DATECH) und DKD (Organisationserlass des BMWi) übergeleitet. Die DAkKS deckt die bisherigen Tätigkeitsfelder von DGA und DKD vollständig ab. Die Akkreditierungen von DACH, DAP, TGA/DATECH und DKD sind bis zum Auslaufen gültig und werden durch die DAkKS überwacht. Die Überwachungspflichten der Akkreditierungen bleiben in dem Maße bestehen, wie sie bei der Erteilung der Akkreditierung bestanden haben. Dies bedeutet, dass die Akkreditierung von der DAkKS nach dem bislang geltenden Regelwerk ihrer bisherigen Akkreditierungsstelle überwacht werden.

Die DAkKS führt derzeit Akkreditierungen in den folgenden Bereichen durch:

- Prüflaboratorien
- Kalibrierlaboratorien
- Medizinische Laboratorien
- Produktzertifizierung
- Managementzertifizierung
- Personenzertifizierung
- Inspektionsstellen
- Ringversuchsanbieter
- Referenzmaterialhersteller

In der Forensik bestehen unterschiedliche Positionen, ob und wie Inspektionsstellen für spezielle forensische Untersuchungen (Ereignis- oder Tatortuntersuchungen) in das Qualitätsmanagement einbezogen werden können, ohne die ereignisortspezifische Flexibilität zu beeinträchtigen. Bei der DAkKS wurde hierzu ein Sektorkomitee „Forensik“ (Abteilung 3) eingerichtet.

Neben den allgemeinen, in diesem Abschnitt schon angesprochenen Forderungen ist auf das folgende, kürzlich in Kraft getretene Dokument zu verweisen:

- DIN EN ISO/IEC 17020 : 2012

„Konformitätsbewertung – Anforderungen an den Betrieb verschiedener Typen von Stellen, die Inspektionen durchführen“

Sie ersetzt die Norm DIN EN ISO/IEC 17020:2004, die wiederum aus der Norm EN 45004:1995 hervorgegangen ist. Damit ist die Übereinstimmung der Europäischen mit der Internationalen Norm hergestellt.

Zur Ergänzung wurden von der DAkkS zwei ergänzende Formulare herausgegeben:

- „Liste einzureichender Unterlagen für die Akkreditierung als Inspektionsstelle nach DIN EN ISO/IEC 17020“
- „Checkliste zur DIN EN ISO/IEC 17020 für Inspektionsstellen“.

Ziel dieser internationalen Norm 17020 ist, das Vertrauen in die Inspektionsstellen zu fördern. Das gelingt durch den Nachweis der Kompetenz, der Unparteilichkeit und der Konsistenz der Inspektionstätigkeiten. Die Inspektionsstellen führen Bewertungen durch, um Informationen über die Konformität der untersuchten Gegenstände mit Vorschriften, Normen, Inspektionsroutinen oder Verträgen zu liefern. Dabei sind auch Fragen zur Quantität, Qualität, Sicherheit, Zweckmäßigkeit zu berücksichtigen. Zielgruppe sind daher Inspektionsstellen, die die Prüfung von Materialien, Produkten, Installationen, Anlagen, Prozessen, Arbeitsabläufen und Dienstleistungen betreiben und die darüber dem Auftraggeber berichten. Deshalb sind auch forensische Tatortuntersuchungen Gegenstand der Inspektion im Sinne dieser Norm. Bezüglich der Unabhängigkeit der forensischen Tätigkeit kommt nur eine Inspektionsstelle nach Typ A in Betracht.

Das Thema der Akkreditierung beschäftigte auch ENFSI (European Network of Forensic Science Institutes) und EA (European co-operation for Accreditation). Diese bemühten sich um einen Leitfaden, um die Anwendung der Norm 17020 zu erleichtern:

WA-5/03

„Guidance for the Implementation of ISO/IEC 17020
in the field of crime scene investigation“

Beide Organisationen ratifizierten diesen Guidance (Leitfaden) im Jahre 2008. Die DAkkS hat diesen Leitfaden bislang noch nicht übernommen. Erwähnt soll noch ein älterer deutscher Leitfaden sein, den der Deutsche Akkreditierungsrat schon 1998 herausgegeben hatte (DAR-5-EM-04), der seinerzeit auch von DACH übernommen wurde; er wurde noch im Jahre 2006 durch DAR-ATF bestätigt.

Ergänzend ist im Bereich der Strafverfolgung auf den in Anwendung des EU-Vertrages vom Rat der EU am 30. Nov. 2009 erlassenen

Rahmenbeschluss 2009/905/JI
über die Akkreditierung von Anbietern kriminaltechnischer Dienste,
die Labortätigkeiten durchführen

hinzuweisen, mit dem der Austausch von Informationen über kriminaltechnisches Beweismaterial und die staatenübergreifende Verwendung von Beweismaterial festgelegt werden. Betroffen sind als Anbieter alle öffentlichen oder privaten Stellen, die auf Verlangen der Strafverfolgungs- und Justizbehörden kriminaltechnische Labortätigkeiten durchführen. Dabei ist der Focus auf die so sensitiven personenbezogenen Daten wie DNA-Profile und daktyloskopische Spuren gerichtet. Dabei soll sichergestellt werden, dass die oben zitierten Grundsätze der Norm DIN EN ISO/IEC 17025 eingehalten werden und dass die Ergebnisse von allen mit Prävention, Aufdeckung und Aufklärung von Straftaten zuständigen Behörden in allen Mitgliedstaaten zuverlässig anerkannt werden. Der Rahmenbeschluss betrifft aber nicht die Maßnahmen außerhalb der Laboratorien.

Die zu treffenden Maßnahmen bezüglich der DNA-Profile sind bis 30.11.2013, die der daktyloskopischen Daten bis 30.11.2015 umzusetzen. Die Akkreditierung erfolgt jeweils durch die nationalen Akkreditierungsstellen.

Allgemein gilt, dass alle akkreditierte Institutionen künftig in ihren Ergebnisberichten und Zertifikaten mit dem Akkreditierungssymbol, bestehend aus dem Zeichen der DAkkS und einer Registrierungsnummer, auf ihren akkreditierten Status hinweisen dürfen.

Aktuelle Informationen und Entwicklungen zur Akkreditierung und zum Procedere in Deutschland sind im Internet bei der DAkkS unter **www.dakks.de** zu erhalten.

Literatur

DIN EN ISO 9000 (Qualitätsmanagementsysteme – Grundlagen, Begriffe)

DIN EN ISO 9001 (Qualitätsmanagementsysteme – Anforderungen)

DIN EN ISO 14001 (Umweltmanagementsysteme – Anforderungen)

DIN EN ISO /IEC 17000 (Konformitätsbewertung, Begriffe, Grundlagen)

DIN EN ISO/IEC 17020 (Konformitätsbewertung, Inspektionen)

DIN EN ISO/IEC 17025 (Prüf- und Kalibrierstationen)

Internet-Informationen zu Akkreditierung in Deutschlands: www.dakks.de

Benes, G.M.E., Groh, P.E., Grundlagen des Qualitätsmanagements, Fachbuchverlag Leipzig im Hanser Fachbuchverlag, 2011

Greßler, U., Göppel, R., Qualitätsmanagement, Bildungsverlag Eins, 2012

Glossar

Begriff, deutsch	Begriff, englisch	Erläuterungen	Seite
Abbrandrate	(mass) burning rate	Masseverlust eines abbrennenden Materials pro Zeiteinheit	119, 123
Absorption	absorption	Intensitätsschwächung elektromagnetischer oder Teilchenstrahlung beim Durchgang durch Materie oder Stoffaufnahme über Grenzflächen hinweg mit homogener Verteilung innerhalb des aufnehmenden Stoffes	220 bis 224, 258, 285, 416, 440
adiabatisch	adiabatic	Zustandsänderung ohne Wärmeaustausch	85, 383, 392, 396
Adsorbat	adsorbat	An einem Adsorbens oberflächlich angelagerte Substanz	197, 259, 260, 362, 363, 416, 417
Adsorbent	adsorbent	Adsorptionsmittel, wie Holzkohle	259, 260, 362, 363, 415, 416, 417, 439

Adsorption	adsorption	Wechselwirkung zwischen einem Adsorbens und einem angelagerten (adsorbierten) Stoff	63, 109, 235, 256, 257, 259, 260, 265, 361 bis 365, 415 bis 421, 439 bis 442
Außenleiter	hot line	stromführende Leitungen im 1-Phasen- bzw. 3-Phasensystem (→ Drehstromsystem) mit Spannung gegen Erdpotential von 230 Volt bzw. 400 Volt	252, 299 bis 303, 218 bis 320, 332 bis 335
Bargraph	bargraph-display	Darstellung der Messdaten in Form einer Skalierung	410
Berstdruck	bursting pressure	Binnendruck eines Behälters, Rohres oder Schlauches, der zu deren Platzen führt, siehe → Zerknall	379, 396
BLEVE	BLEVE	Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion, physikalische Explosion zweiphasiger Systeme	396 bis 401
Brand	fire	Nichtbestimmungsgemäßes Brennen, Schad(ens)feuer, Feuer	12 bis 28
Brandausbreitung	fire propagation/ fire spread	Ausbreitung des Feuers in die Umgebung	15, 34, 39, 71, 73, 83
Brandherd	point of origin, seat of fire	Ort/Bereich der Brandentstehung	114, 155, 175, 469,

Brandlast- verteilung	fire load density (distribution)	Menge/Anordnung/Lage/ Aus- maß der in einem Raum, einem Abschnitt oder einem Gebäude einschließlich der Baukonstruk-tion, soweit diese brennbar, vor-handenen/ verteilten Brandlast (flächenbezogener Heizwert).	152, 251,
Brandnarbe	V shape	Brandzerstörung, meist V-förmig vom Brandherd vertikal ausgehend	173 bis 175
Brandnarbe	burn pattern	Veränderungen an einem Brandobjekt durch Einwirkung von Flammen, Hitze und Rauch, z. B. Waffelbildung bei Holz, Russfahnen, Kondensationsspuren, Abplatzungen; auch Brandzehrung genannt	158, 170 bis 172, 209
Brandraumrekon- struktion	fire scene reconstruction	Wiederherstellen des Ursprungszustandes eines Brandraumes	146, 466 bis 467
Brand- Rekonstruktion	Fire reconstruction	Nachbildung eines Brandverlaufes	466 bis 467
Brandspuren	fire traces	brandspezifische Spuren, die zur Rekonstruktion des Brandverlaufes und des Zündortes herangezogen werden	152, 170 bis 172, 209 bis 210
Brandursache	fire cause	zündendes Zusammenwirken von Brennstoff, Sauerstoff und Zündquelle am gleichen Ort und zu gleicher Zeit	143 bis 146, 157, 163 bis 165, 187, 209 bis 213, 216 bis 218

Brandursachenermittlung (-erforschung)	fire investigation	Feststellung der Brandursache durch direkten oder indirekten Beweis	157, 164, 165, 168, 182, 203 bis 204, 213
brennbare Stoffe, Brennstoffe, Brandstoffe	combustible materials	feste, flüssige und gasförmige Stoffe sowie Dämpfe, Nebel und Stäube, die in Kontakt bzw. Mischung mit Luft/ Sauerstoff entzündet werden können	19 bis 21, 69, 71 bis 73, 393
brennendes Abfallen	fall down	Abfallen brennender Feststoff-Teilstücke	
brennendes Abtropfen	drop down	Abtropfen von brennenden Schmelzteilen	161, 162
chemische Explosion	chemical explosion	Explosion infolge schneller chemischer Umsetzung	378, 382
Chromatographie	chromatography	Trennmethode, durch die ein flüssiges oder gasförmiges Substanzgemisch auf eine mobile (strömende) und ein stationäre (ruhende) Phase verteilt (getrennt) wird	411 bis 417
Deflagration	deflagration	Explosion mit Geschwindigkeit unterhalb der Detonationsgeschwindigkeit	379, 385, 388, 389
Detonation	detonation	Explosion mit Detonationsgeschwindigkeit	101, 378 bis 389, 401
Detonationsgeschwindigkeit	detonation velocity	höchstmögliche Geschwindigkeit einer Explosion	384
Drehstromsystem	three-phase current system	Dreiphasenwechselstrom, bei dem drei zeitlich um 120 °C verschobene Einphasenströme wirken, die in Dreieck- oder Sternschaltung miteinander verkettet sind	299 bis 303

Eluat	eluates	mit einem Elutionsmittel (Eluent) vom Adsorbens eluierter Stoff	418
Erdschluss	earth fault, ground fault	fehlerhafte leitfähige Verbindung eines Außenleiters auf Gegenstände mit Erdpotential, in der Regel mit markanten Schmelzspuren	300, 320 bis 322
Explosion	explosion	schneller mit Druckanstieg, zum Teil mit mechanischen Zerstörungen verbundener physikalischer oder chemischer Vorgang	136, 378 bis 389
Explosionsdruck	explosion overpressure	Überdruck infolge des Temperaturanstiegs der Reaktionsprodukte im Umkreis der Explosion in Abhängigkeit vom Abstand zum Explosionszentrum und vom Zeitpunkt der Explosion	51, 393
explosionsfähiges Gemisch	explosive mixture	Gemisch/Gemenge von Gasen, Dämpfen, Nebeln oder Stäuben mit Luft oder anderen oxidierenden gasförmigen Stoffen	136, 261, 382 bis 391
Fehlerleistung	fault power	an der Fehlerstelle durch den Fehlerstrom umgesetzte Leistung, die zu lokalen Schäden oder zum Brand führen kann	297 bis 315
Fehlerstrom	fault current	fehlerhaft fließender Strom infolge Schädigung der elektrischen Isolierung oder Trennstrecken; siehe → Erd- und Kurzschluss	307 bis 315
Fehlerstromschutzschalter	fault current protection circuit	elektrisches → Überstromschutzorgan, das bei Überschreiten des Bemessungsstroms (Auslösestrom) allpolig und damit auch den zum Erdpotential fließenden Fehlerstrom im Millisekundenbereich abschaltet, auch FI-Schalter oder → RCD bezeichnet	321, 331 bis 337

Feuer	fire	schnell verlaufende Oxidation mit Glimm-, Glut- und/oder Flammerscheinung	Siehe auch Brand
Flamme	flame	Sichtbare Verbrennungszone in der Gasphase	18 bis 19, 21 bis 33
Flammenfront	flame front	Front einer Flammenbrand-Ausbreitung	100, 101, 122
Flammenübersprung	flashover	Pyrolysat-Explosion nach Erhitzung brennbarer Stoffe über Zündtemperatur, hauptsächlich durch Strahlung <i>Achtung: wird auch für Flammenübertritt an der Gebäudeaußenseite auf höhere Stockwerke verwendet</i>	131 bis 136
Flammpunkt	flash point	niedrigste Temperatur, bei der eine Flüssigkeit unter Normbedingungen so viel brennbare Dämpfe entwickelt, dass diese durch eine Zündquelle zu entflammen sind (ohne Weiterbrennen der Flüssigkeit)	51 bis 56, 59 bis 60, 389 bis 391
Flashover siehe auch Flammenübersprung	flash-over	nahezu schlagartig gezündeter Raumbrand nach thermischer Aufbereitung des brennbaren Inhalts, spontane Durchzündung entstandener Pyrolyseprodukte	131 bis 136
Flugfeuer	flying sparks	Forttragen größerer brennender Partikel durch Auftrieb und Wind	172, 250, 251
Fremdentzündung	external ignition	Entzündung durch Flamme oder andere äußere Zündquelle	Siehe auch Fremdzündung 9 bis 12
Funke	spark	leuchtende, heiße Partikel infolge mechanischer Bearbeitung von Metallen oder lichtbogenbedingtes Absprätzen von verflüssigtem Leitermaterial	82, 275 bis 278

Glimmbrand	smouldering fire	Abbrand unterhalb der Zündgrenze der Pyrolyseprodukte	35, 62, 271, 362, 365
Glutbrand	glowing fire	Abbrand in Glutform	33 bis 35, 271
Heißgasschicht	heat gas layer	eine sich an der Decke eines Raumes infolge aufsteigender Brandgase ausbildende heiße Gasschicht.	120, 131 bis 133, 169, 175
Konvektion	convection	siehe Wärmemitführung	17, 18, 76, 170, 271, 387
Kurzschluss	short circuit	fehlerhafte leitfähige Verbindung von Leitern unterschiedlichen Potentials, in der Regel mit markanten Schmelzspuren	318 bis 325
Lichtbogen	arc	elektrischer Überschlag zwischen Leitern unterschiedlichen Potentials (einige Tausend Grad)	311 bis 315
Matrix	matrix	Gesamtheit des analytisch zu untersuchenden Materials (Begleitstoffe einer Analysenprobe)	409 bis 413
Mindestzündenergie	minimum ignition energy	minimal erforderliche Energie zur Zündung eines brennbaren Stoffes	39, 66, 220, 272, 276, 293, 388
Neutralleiter	neutral conductor	Leiter, der mit dem Neutralpunkt des Drehstromsystems (Mittelpunkt) verbunden ist und stromführend sein kann, Kurzbezeichnung N	252, 300 bis 303, 318 bis 320, 332

physikalische Explosion	physical explosion	Bersten eines geschlossenen Behälters infolge einer die Berstgrenze übersteigenden Binnendrucks oder infolge einer schnellen Phasenumwandlung	379 bis 380, 395
Plume	fire plume	voluminöser Bereich der Flammen und der heißen Verbrennungsprodukte, der sich über der Abbrandfläche in Folge des thermischen Auftriebs bildet	210
ppm/ppb	parts per million/ parts per billion	Teile pro Million (ein Millionstel der jeweiligen Einheit)/Teile pro Milliarde (ein Milliardstel der jeweiligen Einheit), $10^{-6}/10^{-9}$	411,
Probenaufbereitung Probenvorbereitung	sample preparation	Methoden, die zur Vorbereitung eines Materials für analytische Messungen eingesetzt werden	409 bis 411
Rauch	smoke	Brandgas mit festen und flüssigen Schwebstoffen (Aerosolen; Ruß, Asche, Brandgase)	105 bis 119, 147, 161, 166 bis 168
Rauchgas-explosion	backdraft	Pyrolysat-Explosion nach Lufteinmischung in Brandraum-Atmosphäre	135 bis 136
Rauchschicht siehe auch Heißgasschicht	smoke layer	Schicht heißen Brandrauches an der Decke	120, 131 bis 133, 169, 175
RCD	residual current device	harmonisierte Bezeichnung für → Fehlerstromschutzschalter	321, 332 bis 336
Rußfahne	soot marks	geometrisch begrenzte Rußanhaftungen, die durch die Einwirkung eines Brandes auf vorhandene brennbare und nichtbrennbare Stoffe, Materialien bzw. Gegenstände entstehen.	169

Schutzleiter	protection earth, protective conductor	separater, auf Erdpotential befindlicher Leiter für Schutzzwecke, Kurzbe- zeichnung PE, mit grün- gelber Kennzeichnung; (mit Neutralleiterfunktion als PEN bezeichnet)	302, 311, 320, 332, 334, 335, 338
Selbstentzündung	self-ignition	Entzündung nach Selbsterhitzungsprozess	9 bis 11, 63 bis 66, 255 bis 267, 357 bis 367
Selbstent- zündungs- temperatur	self-ignition temperature	Temperatur, bei der infolge einer Selbsterwärmung eine Brandzündung erfolgt, siehe auch Selbstentzündung	9 bis 11 65 bis 66, 256 bis 266,
Selbsterhitzung (siehe auch Selbsterwärmung)	self-heating	Phänomen der Erhitzung einer Matrix durch innere biologische oder/und chemische Prozesse	357 bis 361, 455
Spektrometrie	spectrometry	Quantitative analytische Verfahren mit den verschiedenen Bereichen des elektromagnetischen Spektrums	428
Spektroskopie	spectroscopy	Allgemeine Bezeichnung für Analyseverfahren unter Anwendung der elektromagnetischen Strahlung	443 bis 445, 448, 456
Thermoanalyse	thermal analysis	Untersuchungsverfahren, bei denen Materialeigenschaften durch programmiertes Erhitzen oder während einer Selbsterhitzung mess- technisch erfasst werden	64, 450 bis 454

Überstromschutzorgane	overcurrent protection equipment, overload protection device	elektrische Schutzeinrichtung, die bei Überstrom zur Abschaltung des geschützten Außenleiters führt, z. B. Diazed-, Neozed- und NH-Sicherungen, Leistungs- und Motorschutzschalter, RCD	318 bis 323, 336 bis 339
Verbrennungsprodukte	combustion products	neben Wärmeenergie: Gase, Dämpfe, feste und flüssige Schwebstoffe (Aerosole, Rauch)	22 bis 24, 110 bis 111, 173, 504 bis 513
Verbrennungswärme/ Verbrennungsenthalpie	heat of combustion	bei Verbrennung eines Stoffes erzeugte Wärmeenergie pro Masseneinheit, gemessen in kWh oder MJ	19, 83 bis 84, 89,
Wärmefreisetzungsrate	heat release rate	Freisetzung von Wärmeenergie pro Zeit beim Abbrand (Leistung in kW oder MW)	133, 384
Wärmeleitung	conduction	Wärmeübertragung bei direktem Stoffkontakt	17 bis 19, 76, 170, 281, 282, 307, 346
Wärmemitführung siehe Konvektion	convection	Wärmeübertragung über strömende Flüssigkeiten und Gase (siehe Konvektion)	
Wärmestrahlung	thermal radiation	Wärmeübertragung durch elektromagnetische Strahlung, insbesondere im Infrarot-Bereich	29 bis 32, 132, 283, 290, 456, 457
Wärmeübertragung	heat transfer	Überführung von Wärme im heißen Medium auf kältere Umgebung durch Wärmeleitung, Konvektion oder Wärmestrahlung	18, 74, 76, 173, 220

Zerknall	bursting	Bersten eines Behälters durch einen Innendruck, der dessen Berstgrenze überschreitet	178, 223, 226, 229, 261, 378, 379,
Zündenergie	ignition energy	niedrigste Temperatur einer Partikel mit Zündeigenschaften	15, 51, 61, 65, 68, 211, 219, 220, 246, 269 bis 277
Zündfunken	ignition spark	Funken als → Zündquelle	60,
Zündgrenze (siehe Explosions- grenzen)	flammability limit, ignition limit	unterer oder oberer Grenzwert der Konzentration explosionsfähiger Gemische	11, 44, 50, 60, 61, 81, 347, 388 bis 390, 392 bis 393
Zündquelle	ignition source	Energiequelle, die brennbaren oder explosionsfähigen Stoffen/Stoffgemischen die Energie zur Zündung zuzuführen vermag	9 bis 12, 38 bis 39, 57, 61, 82, 136, 173, 180, 219 bis 220, 223, 322, 341, 344, 378, 385, 389 bis 394 ,461 bis 462, 469,

Zündtemperatur	ignition temperature	niedrigste Temperatur a) einer erhitzten Wand, bei der unter genormten Bedingungen ein Zünderfolg eines brennbaren Gas-/Luft-Gemisches erfolgt oder b) eines festen Stoffes, bei dem eine Zündung erfolgt (auch Entzündungstemperatur)	11, 38, 56 bis 58, 62, 132, 223 bis 224, 256 bis 257, 276, 284 bis 286, 365
Zündung	ignition	Einwirkung einer Zündquelle mit der Folge eines Brandes oder einer Explosion	9 bis 14, 17, 29, 220, 255 u. f., 273 u. f., 381 bis 395

Berechnungsbeispiele

Anlage 1 – Beispielrechnungen für die Verbrennung fester bzw. flüssiger Brandstoffe unter Bezug auf Punkt 1.5.8.1

Als Randbedingung wird angenommen, dass die Verbrennung vollständig und vollkommen erfolgt, sowie bei den Umgebungsbedingungen (0 °C und 1 bar)

Die Verbrennung von Holz:

Auf Grund der recht komplizierten Zusammensetzung von Holz (Bestandteile sind Cellulose, Lignin und Hemicellulose) wird auf die Formulierung einer Verbrennungsgleichung verzichtet.

Eine mögliche durchschnittliche Elementarzusammensetzung von Holz ergibt sich mit 48 – 51 Masse-% Kohlenstoff, 43 – 46 Mass.-% Sauerstoff, 5 – 6 Masse-% Wasserstoff und 0,2 – 0,6 Masse-% Mineralsubstanzen und verschiedene Inhaltsstoffe (Harze, Fette, Gerb- und Farbstoffe u. a.). Im Weiteren wird mit einer Zusammensetzung von 49 Masse-% Kohlenstoff, 43 Masse-% Sauerstoff (wird bei der Verbrennungsrechnung vernachlässigt), 6 Masse-% Wasserstoff gerechnet. Auch der natürliche vorhandene Feuchtigkeitsgehalt wird bei der Elementarzusammensetzung nicht berücksichtigt. Gehalte an Stickstoff, Schwefel und Mineralien werden vernachlässigt.

Für die zur Verbrennung entsprechend vorgenannter Elementarzusammensetzung notwendige Sauerstoffmenge bezogen auf 1 kg Holz ergibt sich:

$$O_{2,\min} = 1,867 \cdot 0,49 + 5,6 \cdot 0,06 - 0,7 \cdot 0,43$$

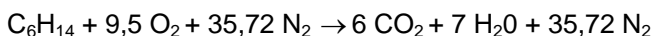
$$O_{2,\min} = 0,9489$$

Bezogen auf den Luftbedarf ergibt sich:

$$L_{\min} = \frac{= 0,9489}{0,21} = 4,5185 \text{ Nm}^3 \text{ kg}^{-1}$$

Da Holz in der Regel ca. 15 Masse-% Feuchtigkeit enthält, reduziert sich der theoretische Luftbedarf um ca.15 %, d. h. er beträgt 3,840 Nm³ kg⁻¹.

Die Verbrennung von Hexan:



Die Elementarzusammensetzung von Hexan ergibt sich mit C = 83,7 Masse-% und H = 16,3 Masse-%. Zur Verbrennung entsprechend vorgenannter Elementarzusammensetzung ergibt sich eine notwendige Sauerstoffmenge bezogen auf 1 kg Hexan von:

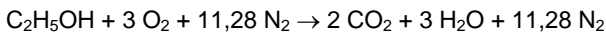
$$O_{2,\min} = 1,867 \cdot 0,837 + 5,6 \cdot 0,163 = 2,4754$$

Bezogen auf den Luftbedarf ergibt sich:

$$L_{\min} = \frac{= 2,4574}{0,21} = 11,78 \text{ Nm}^3 \text{ kg}^{-1}$$

Der Luftbedarf für die vollkommene Verbrennung von Hexan beträgt $11,78 \text{ Nm}^3 \text{ kg}^{-1}$.

Die Verbrennung von Ethanol:



Die Elementarzusammensetzung von Ethanol ergibt sich mit C = 50 Masse-%, O = 37,5 Masse-% und H = 12,5 Masse-%. Zur Verbrennung entsprechend vorgenannter Elementarzusammensetzung ergibt sich eine notwendige Sauerstoffmenge bezogen auf 1 kg Ethanol von:

$$O_{2,\min} = 1,867 \cdot 0,5 + 5,6 \cdot 0,125 - 0,7 \cdot 0,33 = 1,4025 \text{ Nm}^3 \text{ kg}^{-1}$$

Bezogen auf den Luftbedarf ergibt sich:

$$L_{\min} = \frac{= 1,4025}{0,21} = 6,6785 \text{ Nm}^3 \text{ kg}^{-1}$$

Der Luftbedarf für die vollkommene Verbrennung von Ethanol beträgt $6,678 \text{ Nm}^3 \text{ kg}^{-1}$.

Berechnung der Volumina der Verbrennungsprodukte

$$\text{Wasserdampf} \quad V_{\text{H}_2\text{O}} = 11,2' \text{ H} + 1,24 \text{ W}'$$

$$\text{Kohlendioxid} \quad V_{\text{CO}_2} = 1,86 \text{ C}'$$

$$\text{Schwefeldioxid} \quad V_{\text{SO}_2} = 0,7 \text{ S}'$$

$$\text{Stickstoff} \quad V_{\text{N}_2} = 7 \text{ C}' + 21 (\text{H}' - \text{O}'/8) + 2,63 \text{ S}' + 0,8 \text{ N}'$$

(Symbol' = Molmasse; V_{Symbol} = Volumen der einzelnen Verbrennungsprodukte)

Gesamtvolumen der Verbrennungsprodukte V_{Prod} beträgt pro kg Stoffe bei $\alpha_{\text{Luft}} = 1$:

$$V_{\text{Prod}} = V_{\text{H}_2\text{O}} + V_{\text{CO}_2} + V_{\text{SO}_2} + V_{\text{N}_2} = 32,2 H' + 8,86 C' + 3,33 S' + 0,8 N' + 1,24 W' - 2,63 O'$$

bei Luftüberschuss → Luftvolumen bei 273,15 K und 101 325 Pa

$$V_{\text{Luft}} = (\alpha_{\text{Luft}} - 1) V_{\text{Luft}}$$

Gesamtvolumen Stickstoff pro kg Stoff in den Verbrennungsprodukten:

$$V^{\circ}_{\text{N}} = V_{\text{N}_2} + 0,79 (\alpha_{\text{Luft}} - 1) V^{\circ}_{\text{Luft}}$$

für Sauerstoff:

$$V^{\circ}_{\text{O}_2} = 0,21 (\alpha_{\text{Luft}} - 1) V^{\circ}_{\text{Luft}}$$

Beispiel **Holz** mit einer Zusammensetzung von C = 42 Masse-%; H = 5 Masse-%; O = 37 Masse-%; N < 1,5 Masse-%; W (Feuchte) ca. 15 Masse-%; A (Mineral) <1 Masse-%, wobei die Gehalte an der Stickstoff, Schwefel und Mineralien, wie vorgenannt, bei der Verbrennungsrechnung der Einfachheit halber vernachlässigt werden.

Bei vollständiger Verbrennung entstehen:

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = 11,2 H' + 1,24 W' = 11,2 \cdot 0,05 + 1,24 \cdot 0,15 = \mathbf{0,746 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}}$$

$$V_{\text{N}_2} = 7 C' + 21(H' - O'/8) = 7,0 \cdot 0,42 + 21(0,05 - 0,37/8) = \mathbf{2,93 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}}$$

$$V_{\text{CO}_2} = 1,86 C' = 1,86 \cdot 0,42 = \mathbf{0,7812 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}}$$

$$V_{\text{Prod}} = V_{\text{H}_2\text{O}} + V_{\text{CO}_2} + V_{\text{N}_2} = \mathbf{4,46 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}}$$

Zusammenfassung Abgas: 65,7 % N₂, 17,5 % CO₂, 16,7 % H₂O

Hexan mit einer Elementarzusammensetzung von C = 83,7 Masse-% und H = 16,3 Masse-%.

Bei vollständiger Verbrennung entstehen:

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = \mathbf{1,86 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}}$$

$$V_{\text{CO}_2} = \mathbf{1,55 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}}$$

$$V_{\text{N}_2} = \mathbf{9,32 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}}$$

$$V_{\text{Prod}} = \mathbf{12,73 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}}$$

Zusammenfassung Abgas: 14,61 % H₂O, 12,17 % CO₂, 73,21 % N₂

Ethanol mit einer Elementarzusammensetzung von C = 50 Masse-%, O = 37,5 Masse-% und H = 12,5 Masse-%.

Bei vollständiger Verbrennung entstehen:

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = 1,4 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$$

$$V_{\text{CO}_2} = 0,9318 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$$

$$V_{\text{N}_2} = 5,264 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$$

$$V_{\text{Prod}} = 7,76 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$$

Zusammenfassung Abgas: 18,43 % H₂O, 12,29 % CO₂, 69,28 % N₂

Eine exakte Abschätzung der Feststoffanteile (Ruß, Asche) im Rauchgas ist in der Regel nicht möglich, doch ist beim Verbrennen von reinen Stoffen neben dem fast vollständigen Fehlen von Asche hinsichtlich Ruß von einem Masseanteil von 2 bis 5 % (außer Ethanol) bezogen auf den Kohlenstoffanteil im Brennstoff auszugehen. Bei Schadenfeuern muss bedingt durch die Beteiligung einer Vielfalt von Brandstoffen sowohl mit einer erheblichen Rußfreisetzung als auch einer verstärkten Freisetzung von Aschen ausgegangen werden.

Anlage 2 – Beispiel zur Berechnung der Flammentemperatur – siehe auch Punkt 1.5.2

Für die Berechnung spezieller Flammentemperaturen eignen sich die nachfolgend beschriebenen Rechenwege.

Grundlage für die Zur Berechnung von T_{Fkolor} bildet die Wärmebilanzgleichung:

$$\Delta H_{U,m} = \int_{T_0}^{T_{Fkolor}} \left(\sum c_{m,i} \right) dt = \sum C_{m,i} (T_{Fkolor} - T_0) \quad (1)$$

$$T_{Fkolor} - T_0 = \frac{\Delta H_{U,m}}{\sum C_{p,i}} \quad (2)$$

Es bedeuten:

$\Delta H_{U,m}$ = molare Verbrennungswärme in J mol^{-1}

$C_{p,i}$ = molare Wärmekapazität der Verbrennungsprodukte in $\text{J K}^{-1} \text{mol}^{-1}$

T_{Fkolor} = kalorische Flammentemperatur in K

T_0 = Ausgangstemperatur in K

Diese an sich einfache Beziehung kann nicht direkt zur Berechnung von T_{Fkolor} verwendet werden, weil die Wärmekapazitäten der Verbrennungsgase selbst temperaturabhängig sind.

Die Abhängigkeit der Wärmekapazität von der Temperatur kann man durch eine quadratische Gleichung der Form

$$\bar{C}_{p,i} \Big|_0^T = a \pm bT \pm c \cdot T^2 \quad (3)$$

näherungsweise darstellen. Setzt man diesen Ausdruck in die Gleichung (2) ein, so erhält man eine kubische Gleichung der Form:

$$a \cdot T \pm b \cdot T^2 \pm c \cdot T^3 - d = 0 \quad (4)$$

Eine Lösung dieser Gleichung ist nur mittels Näherungsmethoden möglich. Zwecks Vereinfachung wird von der Annahme ausgegangen, dass die Temperaturabhängigkeit der Wärmekapazität linear sei:

$$\bar{C}_{p,i} \Big|_0^T = a + bT \quad (5)$$

Daraus ergibt sich eine quadratische Gleichung der Form:

$$a \cdot T_{Fkalor} + b \cdot T_{Fkalor}^2 - d = 0 \quad (6)$$

Diese Gleichung ist zur Bestimmung von Näherungswerten geeignet.

In der technischen Verbrennung werden im Zusammenhang mit der Berechnung der Flammentemperatur die Temperatur des Brennstoffs, die Vorwärmtemperatur der Luft und das Luftverhältnis α (auch Luftüberschusskoeffizient λ genannt) sowie die vom Ofen an die Umgebung abgegebene Wärmemenge bei der Berechnung berücksichtigt. Dann ergibt sich folgender Zusammenhang:

$$\overline{C}_V \cdot t_{Fkalor} = \frac{H_u + c_B \cdot t_B + \lambda \cdot L_{min} \cdot c_L \cdot t_L - q_{St}}{V_{min} + (\lambda - 1) \cdot L_{min}} \quad (7)$$

Es bedeuten:

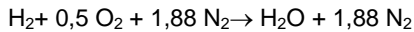
- C_V = Wärmekapazität der Verbrennungsprodukte bei t_{Fkalor}
- H_u = unterer Heizwert in kJ kg^{-1}
- c_B = Wärmekapazität des Brennstoffs in $\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$
- t_B = Temperatur des Brennstoffs in $^\circ\text{C}$
- λ = Luftüberschusskoeffizient
- L_{min} = stöchiometrisch erforderliche Luftmenge
- c_L = Wärmekapazität der Luft in $\text{kJ km}^{-3} \text{K}^{-1}$
- t_L = Temperatur der Luft in $^\circ\text{C}$
- q_{St} = die pro kg -Brennstoff an die Umgebung abgegebene Wärmemenge in kJ kg^{-1}
- V_{min} = Volumen der Verbrennungsprodukte bei stöchiometrischer Konzentration in m^3

Die Gleichung (7) wird graphisch ausgewertet und man erhält z. B. für verschiedene λ Kurvenscharen, aus denen man t_{Fkalor} entnehmen kann. Solche Diagramme bezeichnet man als h, t -Diagramme der Verbrennung.

Die Berechnung von T_{Fkalor} lässt sich aber bei Variation des Rechenganges auch für andere Konzentrationen als c_{stoch} ausführen.

Werden die vorgenannten Sachverhalte auf den Aspekt einer einzelnen Flamme übertragen, wird in der Regel ebenfalls von einer Verbrennungstemperatur gesprochen. Unter T_{Freal} wird die Temperatur in der heißesten Reaktionszone der Flamme unter den tatsächlichen Verbrennungsbedingungen verstanden. Diese Temperatur kann gemessen werden. Die reale Flammentemperatur widerspiegelt dabei alle Faktoren, wie sie sich in Form von Wärmefreisetzung und Wärmeverlusten in der Flamme ergeben (z. B. Luftüberschussfaktor, Strömungsverhältnisse, Brennwert, Eigenschaften der Verbrennungsprodukte, Strahlungseigenschaften u. a.). Die Wärmeverluste sind von den Verbrennungsbedingungen abhängig, daher kann T_{Freal} für ein und denselben Stoff in gewissen Grenzen variieren.

Zu berechnen ist T_{Fkolor} für die Verbrennung von Wasserstoff und Luft. Die Verbrennungsgleichung für 1 Mol H_2 lautet:



Im Weiteren wird eine analoge Beziehung zur Gleichung (25) benutzt,

$$\bar{C}_v = p + q \cdot T_{Fkolor} \quad (8)$$

für die die Konstanten in der nachfolgenden Tabelle angegeben werden.

Tab.: Konstanten für die Gleichung (8)

Gas	$p \cdot 10^{-3}$	q
Einatomige Gase	12,56	0,00
zweiatomige Gase (H_2 , H_2 , O_2 , CO)	19,58	1,88
CO_2	37,02	2,43
$H_2O(g)$	18,48	9,00

und es gilt $T_{Fkolor} = \frac{\Delta H_{m,i}}{\sum C_{p,i}}$ und damit

$$T_{Fkolor} - T_0 = \frac{\Delta H_{m,i}}{\sum p + T_{Fkolor} \cdot \sum q + \eta \cdot R} \quad (9)$$

Für die Berechnung ergibt sich:

$$10^{-3} \sum p = 18,48 + 1,88 \cdot 19,58 - 55,29$$

$$\sum q = 9,00 + 1,88 \cdot 1,88 - 12,53$$

$$\sum C_v = 55,29 \cdot 10^3 + 12,53 \cdot T_{Fkolor}$$

Da die Verbrennung bei konstantem Druck stattfindet, ist C_v in C_p umzurechnen.

So gilt :

$$C_p = C_v + \eta \cdot R \quad (10)$$

für $R = 8314 \text{ kJ mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$

was in Gleichung (9) schon berücksichtigt war. Es ergibt sich:

$$C_{p,i} = 55,29 \cdot 10^3 + 12,53 \cdot T_{Fkolor} + (1+1,88) 8,314$$

$$C_{p,i} = 79,23 \cdot 10^3 + 12,53 \cdot T_{Fkolor}$$

Nach Einsetzen in (8) ergibt sich $\Delta H_p = 241997 \text{ kJ kmol}^{-1}$ und $T_0 = 273 \text{ K}$

$$T_{Fkolor} - 273 = \frac{241997 \cdot 10^{-3}}{79,23 \cdot 10^3 + 12,53 \cdot T_{Fkolor}}$$

Daraus errechnet sich T_{Fkolor} zu: 2.463 K bzw. $t = 2.189 \text{ }^\circ\text{C}$

Die Berechnung mit einem genaueren Verfahren führt zum Wert von 2.230 $^\circ\text{C}$, was einem $\Delta T = 41$ Kelvin entspricht. Bei dieser Berechnung war die sehr starke Vereinfachung vorgenommen worden, die Temperaturabhängigkeit der Wärmekapazität der Gase durch eine lineare Abhängigkeit zu erfassen, was von der Realität weit entfernt ist. Deshalb wird mit einer Berechnungsmethode für die Berechnung von T_{Fkolor} gearbeitet, bei der die lineare Abhängigkeit der Wärmekapazität in kleineren Bereichen im Vergleich zur grundsätzlichen Abhängigkeit berücksichtigt wird.

Der Heizwert der Brandstoffe entspricht dem Wärmeinhalt der Verbrennungsprodukte:

$$H_U = H_{Pr od.} \quad (11)$$

Der Wärmeinhalt der Verbrennungsprodukte lässt sich mit der Gleichung (12) berechnen:

$$H_{Pr od.} = V_{prod.} \cdot \bar{C}_{Pr od.} \cdot t_{Fkal.} \quad (12)$$

Es bedeuten:

H_{Prod} = Enthalpie der Verbrennungsprodukte in $\text{kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$

V_{Prod} = Volumen der Verbrennungsprodukte in $\text{m}^3 \text{ kg}^{-1}$

C_{Prod} = mittlere spezifische Wärme der Verbrennungsprodukte in $\text{kJ km}^{-3} \text{ K}^{-1}$

T_{Fkolor} = kalorische Flammentemperatur in K

t_{Fkolor} = kalorische Flammentemperatur in $^\circ\text{C}$

Weil die Verbrennungsprodukte aus verschiedenen Gasen bestehen, deren spezifische Wärmen sich stark unterscheiden, errechnet sich die Produktenthalpie durch Summation der Einzelenthalpien.

$$H_{Pr od.} = V_{RO_2} + \bar{C}_{H_2O} \cdot t_{Fkolor} + V_{H_2O} \cdot \bar{C}_{H_2O} \cdot t_{Fkolor} + V_{N_2} \cdot \bar{C}_{N_2} \cdot t_{Fkolor} \quad (13)$$

Hierbei bedeuten:

V_{RO_2} , $V_{RO_2H_2O}$, V_{N_2} = Volumen der Komponenten der Verbrennungsprodukte in m^3 ,
wobei $V_{RO_2} = V_{CO_2} + V_{SO_2}$

\bar{C}_{CO_2} , \bar{C}_{H_2O} , \bar{C}_{N_2} = mittlere spezifische Wärmen der Komponenten der Verbrennungsprodukte CO_2 , H_2O , N_2 (die C_p -Werte von CO_2 entsprechen näherungsweise denen von SO_2).

Zu beachten sind die erheblichen Abhängigkeiten der Enthalpien der Einzelgase von der Temperatur.

$T_{F_{kolor}}$ erhält man durch Auswahl einer Temperatur, bei der die Summe der Enthalpien der Verbrennungsprodukte der Verbrennungswärme des Stoffes entspricht. Man bestimmt die Enthalpien der Verbrennungsprodukte bei einigen Temperaturen und wählt die zwei Werte aus, zwischen denen sich der Wert des Heizwertes des Stoffes befindet. Der gesuchte Wert für $t_{F_{kolor}}$ wird dann durch lineare Interpolation zwischen diesen beiden Werten ermittelt.

Hierzu folgendes Beispiel:

Ein Dieseldieselkraftstoff hat folgende Zusammensetzung:

C: 86 % , H: 13,7 % , S: 0,1 % , O + N: 0,2 %

Lösung:

Berechnung des Heizwertes ΔH_U in $kJ\ kg^{-1}$

$$H_U = 539,4 C + 1257 H - 108,9(O-S) - 25,1 (9H+W)$$

$$H_U = 339,4 \cdot 86 + 1257 \cdot 13,7 - 108,9(0,2 - 0,1) - 25,1 \cdot (9 \cdot 13,7 + 0)$$

$$H_U = 43\,221,526\ kJ\ kg^{-1}$$

Berechnung des Volumens der Verbrennungsprodukte in Kubikmetern bezogen auf ein Kilogramm Brandstoff, wobei gilt:

$$V_{CO_2} = 1,86 C'$$

$$V_{H_2O} = 11,2 H'$$

$$V_{SO_2} = 0,7 S'$$

$$V_{N_2} = 7 C' + 21 H' + 2,63 S' + 0,8 N' - 2,63 O'$$

Berechnungsbeispiele

Es bedeuten: C', H', S', N', O' = prozentualen Massenanteile des Elements im Brandstoff
 $V_{CO_2} = 1,86 \cdot 0,86 = 1,6 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$

$$V_{H_2O} = 11,2 \cdot 0,137 = 1,53 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$$

$$V_{SO_2} = 0,7 \cdot 0,001 = 0,007 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$$

$$V_{N_2} = 7 \cdot 0,86 + 21 \cdot 0,137 + 2,63 \cdot 0,001 + 0,8 \cdot 0,001 - 2,63 \cdot 0,001 = 8,925 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$$

Das Gesamtvolumen beträgt:

$$V_{Prod} = V_{CO_2} + V_{H_2O} + V_{SO_2} + V_{N_2}$$

$$= 1,6 + 1,53 + 0,007 + 8,925 = 12,062 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$$

Für die mittlere Enthalpie der Verbrennungsprodukte ergibt sich entsprechend:

$$H_{Prod.} = \frac{H_U}{V_{Prod.}} = 43.221,526/12,062 = 3.582,4 \text{ kJ m}^{-3} \quad (14)$$

Beispiel für die Berechnung der Flammentemperatur:

Es wird von der Annahme ausgegangen, dass der Hauptanteil der Verbrennungsprodukte vom Stickstoff herrührt, weshalb hinsichtlich der Temperatúrauswahl von der Enthalpie des Stickstoffs ausgegangen wird.

Die Enthalpie des Stickstoffs beträgt im Bereich der Temperaturen 2.300 und 2.400 °C 3.582,4 kJ m⁻³. Unter Berücksichtigung der Anteile der anderen Gase wird eine Temperatur von 2.200 °C gewählt.

Für diese 2.200 °C errechnet sich die Enthalpie der Verbrennungsprodukte wie folgt:

$$CO_2 \quad 1,6 \cdot 5392,5 = 8.628$$

$$H_2O \quad 1,53 \cdot 4405,8 = 6.740,87$$

$$SO_2 \quad 0,007 \cdot 5337,2 = 37,36$$

$$N_2 \quad 8,925 \cdot 3306,3 = \underline{2.9508,73}$$

$$\underline{\underline{44.914,96 \text{ kJ kg}^{-1}}}$$

Da die Enthalpie aber die 43.221,526 kJ kg⁻¹ nicht übersteigen kann, muss die Temperatur unter 2.200 °C liegen. Es wird deshalb erneut eine tieferliegende Temperatur gewählt: → 2.100 °C.

Für diese Temperatur wird die Enthalpie der Verbrennungsprodukte analog berechnet:

$$\text{CO}_2 \quad 1,6 \cdot 5118,2 \quad = \quad 8.189,12$$

$$\text{H}_2\text{O} \quad 1,53 \cdot 4166,1 \quad = \quad 6.374,13$$

$$\text{SO}_2 \quad 0,007 \cdot 5059,4 \quad = \quad 35,416$$

$$\text{N}_2 \quad 8,925 \cdot 3142,9 \quad = \quad \underline{28.050,59}$$

$$\underline{\underline{42.649,05 \text{ kJ kg}^{-1}}}$$

Der $t_{F_{\text{kalor}}}$ -Wert muss also zwischen 2.100 und 2.200 °C liegen.

Jetzt wird interpoliert. Einem Temperaturunterschied von 100 K entsprechen:

$$44.914,96 - 42.649,05 = 2.265,910 \text{ kJ kg}^{-1}$$

Der Unterschied zwischen dem Heizwert H_u und der Enthalpie H_{prod} für 2.100 °C beträgt
 $43.221,26 - 42.649,05 = 572,21 \text{ kJ kg}^{-1}$

Daraus folgt:

$$t_{F_{\text{kalor}}} \sim \frac{(2.100 + 572,21) \cdot 100}{2265,910} \sim 2.125 \text{ °C}$$

Anlage 3 – Berechnungsmöglichkeiten zur Charakterisierung der Brand- und Explosionsgefährlichkeit von Dämpfen brennbarer Flüssigkeiten

Berechnungen zum Stofftransport in unbewegter Luft:

$$C_S = \frac{P_{DampfSätt}}{P_{Umg}} \quad (1)$$

1. Sättigungskonzentration $C_{Sätt}$ für die Temperaturen 18 °C (als $C_{Sätt1}$) und 23 °C ($C_{Sätt2}$)

$C_{Sätt1} = 0,053$, $C_{Sätt2} = 0,082$

2. Niveau Konzentration 0 Vol% für die Temperaturen 18 °C (als h_1) und 23 °C (h_2)

($D = 0.0432 \text{ m}^2 \cdot \text{h}^{-1}$ bei 20 °C - berechnet):

$$h_{Dampf} = \left[\frac{12 \cdot D \cdot \tau}{1 - C_{Sätt}} \right]^{0,43} \quad (2)$$

Zeit τ in Std.	0,5	1	1,5	2	4
h_1 in m	0,57	0,77	0,92	1,00	1,4
h_2 in m	0,58	0,782	0,931	1,05	1,42

3. Niveau Konzentration $C_{Z,u}$ (Vol%) für die Temperaturen 18 °C (als h_1) und 23 °C (h_2)

($D = 0.0432 \text{ m}^2 \cdot \text{h}^{-1}$ bei 20 °C - berechnet):

$$x = h_{Dampf} \left[1 - \sqrt{\frac{C_{Z,u}}{C_{Sätt}}} \right] \quad (3)$$

Zeit τ in Std.	0,5	1	1,5	2	4
h_1 in m	0,134	0,181	0,216	0,2352	0,33
h_2 in m	0,223	0,301	0,358	0,404	0,547

4. Berechnete Menge m_{Fl} an verdampftem Ethanol (Verdampfungsfläche – Originalbehälter, Dampfdichte für Ethanol $-1,59 \text{ kg m}^{-3}$):

$$m_{Fl} = 2C_S \cdot \rho_{Fl} \cdot A_{Lache} \sqrt{\frac{D \cdot \tau}{3(1 - C_S)}} \quad (4)$$

Zeit τ in Std.	0,5	1	1,5	2	4
Menge in kg bei C_{s1} in m	0,00126	0,00178	0,00218	0,00251	0,00355
Menge in kg bei C_{s2} in m	0,00197	0,0028	0,0034	0,00395	0,00558

Berechnung des Ausbreitungsradius r_a der Schwadenwolke mit $C \geq C_{Z,u}$ unter Annahme von $\varphi \geq 1,5$, Windstille und dem Vorhandensein einer ebenen Fläche

$$r_A = \frac{C_{Sätt} \cdot A_{Lache} \cdot \varphi^2 \cdot \tau}{C_{Z,u} \cdot h_{Dampf} \cdot 4,2 \cdot 10^3} \quad (5)$$

Auf eine Berechnung wird an dieser Stelle verzichtet, doch zeigen schon die Höhenabschätzungen für $C_{Z,u}$, dass sich die Zündgrenze sehr nahe zur Oberfläche der brennbaren Flüssigkeit einstellt.

- A_{Lache} = Lachenfläche in m^2
- $C_{Sätt}$ = Sättigungskonzentration in Raumteilen
- C_h = Konzentration in der Höhe h in Raumteilen
- $C_{Sätt}$ = Sättigungskonzentration in Raumteilen
- $C_{Z,u}$ = untere Zündgrenze Konzentration in Raumteilen
- h = Höhen in m
- $h_{Dampf,x}$ = Höhen in m
- r_a = Ausbreitungsradius am Boden in m
- τ = Zeit in s
- D = Diffusionskoeffizient in $m^2 \text{ kg}^{-1}$
- $p_{Dampf,h}$ = Dampfdruck in der Höhe h in Pa
- $p_{Dampf,Sätt}$ = Sättigungsdampfdruck in Pa
- p_{Umg} = Umgebungsdruck in Pa
- y = Rechengröße für Fehlerfunktion
- z = Luftwechsel im Raum in h^{-1}
- φ = Relative Dampfdichte zu Luft
- ρ_{Fl} = Dichte des Dampfes in $kg \text{ m}^{-3}$

Berechnungen zum Stofftransport in bewegter Luft:

1. Massestrom \dot{m}_{Fl} an pro Stunde verdampftem Ethanol (Molmasse M - Ethanol, Sättigungsdampfdruck p_0 – Ethanol, angenommene horizontale Luftströmung $w = 0,1 \text{ m s}^{-1}$ parallel zur Flüssigkeitsfläche, Verdampfungsfläche wie im Originalbehälter):

$$\dot{m}_{Fl} = K_x \cdot A_{Lache} \cdot F_m \cdot \tau \quad (6)$$

K_x ist der Koeffizient der Masseübertragung in $\text{kg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$

F_m ist die mittlere Bewegungskraft der Masseübertragung

oder in Form des empirischen Ansatzes $\dot{m}_{Fl} = Mp_0A(0,352 + 0,786w)10^3 \quad (7)$

0,06774 kg h^{-1} für $p_{Dampf} = 40 \text{ Torr}$ bei $18 \text{ }^\circ\text{C}$, 0,105 kg h^{-1} für $p_{Dampf} = 62 \text{ Torr}$ bei $23 \text{ }^\circ\text{C}$

2. Berechnung des Dampfvolumens mit explosionsgefährlicher Konzentration bei einem Massestrom \dot{m}_{Fl} an Ethanoldampf pro Stunde, der Verdampfungszeit τ , des Sättigungsdampfdruckes für Ethanol und der Höhe der Konzentration $C_{Z,u}$ von $0,072 \text{ kg m}^{-3}$ (5):

$$V_{Dampf} = \frac{\dot{m}_{Fl} \cdot \tau}{0,5C_{Z,u}} \quad (8)$$

Zeit τ in Std.	0,5	1	1,5	2	4
Volumen in m^3 bei m'_{Fl1}	0,941	1,88	2,82	3,763	7,527
Volumen in m^3 bei m'_{Fl2}	1,458	2,917	4,375	5,833	11,666

3. Berechnung der Zeitdauer, bis sich in einem Raum mit einem Volumen von 6.000 m^3 (geschätztes Volumen der o. g. Arbeitsstätte) eine durchgängige explosionsgefährliche Konzentration für m'_{Fl1} und m'_{Fl2} ausbildet:

$$\tau = \frac{0,5C_{Z,u} \cdot V_R}{\dot{m}_{Fl}} \quad (9)$$

$\tau_1 = 3188,6 \text{ Stunden}$, $\tau_2 = 2057,1 \text{ Stunden}$

Aus dieser Berechnung ergibt sich, dass zur Erreichung einer explosionsgefährlichen Konzentration ($0,5 C_{Z,u}$) an einem beliebigen Ort im o. g. Raum während der vorgenannten Zeiträume 216 kg Ethanol verdampfen müssten.

Anlage 4 – Abschätzung einer mittleren Brandraumtemperatur im Sinne einer Preflashover Situation

Unter Berücksichtigung der Formeln 77 bis 80 in Kapitel 1 (Details siehe dort) wurde eine Abschätzung für eine Brandraumtemperatur in einem vorgegebenen Brandraum (siehe nachfolgende Angaben) im Zusammenhang mit dem Verbrennen von 1,0 kg Brandstoff (bestehend aus einem Polyurthanschaumstoff und einer gewebearmierten PVC-Hülle) innerhalb einer Zeit von 7 Minuten vorgenommen. Die nachfolgenden Angaben enthalten die Erläuterung der Parameter und deren angenommene Größenordnung bezogen auf das nachgebaute Brandobjekt. Zu berechnen ist die Temperaturdifferenz ΔT in K:

T_0 - Umgebungstemperatur in K hier 293 K

\dot{Q} - Gesamtwärmefreisetzungsrate des Brandes in kW – war ebenfalls zu berechnen

g - Erdbeschleunigung - 9,91 m s⁻²

c_p - spez. Wärme der Luft in kJ kg⁻¹ K⁻¹ hier 1,0007

ρ_0 - Dichte der Raumluft in kg m⁻³ hier 1,3

A_0 - Öffnungsfläche im Raum in m² hier 0,25 für Lüfteröffnungen

H_0 - Höhe der Öffnung in m hier 0,2 für Lüfteröffnungen

A_W - Fläche der Umbauung in m² hier 46,53

C_{pst} - spez. Wärmekapazität der Umbauung in kJ kg⁻¹ K⁻¹ hier 1,1 für Gipskarton

ρ_{st} - Dichte der Umbauung in kg·m⁻³ hier 0,9 für Gipskarton

λ_{st} - Wärmeleitfähigkeitskoeffizient der Umbauung in kW m⁻¹ K⁻¹ hier 0,0002 für Gipskarton

τ - Brandeinwirkungsdauer in s hier 420

Auf der Grundlage der Berechnung ergibt sich eine Erhöhung der Raumdurchschnittstemperatur um 44,83 K, das entspricht einer mittleren Raumtemperatur von ca. 67 °C nach dem Verbrennen von 1,0 kg Brandstoff in der genannten Zusammensetzung und einer Branddauer von 420 Sekunden. Dieses Ergebnis deckt sich auch gut mit experimentell ermittelten Temperaturen, wobei eine mittlere Temperatur von ca. 56 °C gemessen wurde.

Tabellenanhang

Physikalisch-chemische Kenndaten

Inhalt

Tab. 1: Hauptbestandteile der Luft (3)	521
Tab. 2: Dichten unter Druck verflüssigter Gase (28, 49, 59).....	521
Tab. 3: Relative Dampfdichte ausgewählter Stoffe (49)	522
Tab. 4: Diffusionskoeffizienten D von Gasen und Dämpfen in Luft (14, 28, 36, 49)	523
Tab. 5: Eigenschaften von Gasen (2, 13, 15, 29, 33, 36, 42)	524
Tab. 6: Eigenschaften flüssiger organischer Stoffe (brennbare Flüssigkeiten) (2, 3, 19, 30, 48)	525
Tab. 7: Eigenschaften anorganischer Stoffe – Metalle und Übergangsmetalle sowie Metalllegierungen (15, 17, 28, 51, 56)	527
Tab. 8: Eigenschaften anorganischer Stoffe – Nichtmetalle und technische Produkte (14, 17, 28, 51, 56).....	530
Tab. 9: Schmelzpunkte einiger oxydierend wirkender Stoffe (3, 40, 56)	532
Tab. 10: Eigenschaften ausgewählter brennbarer technischer Produkte (15, 17, 51, 56).....	533
Tab. 11: Eigenschaften ausgewählter organischer Feststoffe (3, 14, 30, 39)	535
Tab. 12: Eigenschaften von hochpolymeren Stoffen (Kunststoffe) (7, 8, 12, 15, 17, 18, 36, 37, 38, 42, 45, 51, 56, 59)	536
Tab. 13: Kurzzeichen und Namen wichtiger Kunststoffe – in Anlehnung an DIN 7728, Teil 1	538
Tab. 14: Wärmeleitfähigkeit von ausgewählten Bau- und Dämmstoffen Auszug aus DIN 4108, Teil 4	539
Tab. 15: Absorptionsgrad ausgewählter Stoffe (1, 23, 47)	540
Tab. 16: Absorptionsgrad ausgewählter Baustoffe (23, 47).....	541
Tab. 17: Absorptionsgrad von Polymeren (43)	541
Tab. 18: Absorptionsgrad von Polymeren in Abhängigkeit von der Art und Temperatur der Strahlungsquelle (43).....	542
Tab. 19: Zündgrenzen, Flamm- und Zündpunkte brennbarer Gase und Flüssigkeiten (4, 15, 19, 34, 35, 36, 39).....	543
Tab. 20: Beispiele für die Einteilung von Gasen und Dämpfen in Temperaturklassen entsprechend ihrer Zündtemperatur (1, 21)	545
Tab. 21: Sicherheitstechnische Kennzahlen Explosionsschutz für Gase und Dämpfe (1, 9, 10, 19, 17, 27, 37).....	546
Tab. 22: Zündgrenzen brennbarer Gase und Dämpfe in Luft bzw. Sauerstoff (4, 6, 15, 17, 19, 34, 35, 39).....	548
Tab. 23: Eigenschaften ausgewählter brennbarer (technischer) Flüssigkeiten (15, 35, 48).....	549

Tabellenanhang

Tab. 24: Mit Wasser vollständig mischbare brennbare Flüssigkeiten – Auswahl.....	549
Tab. 25: Verdunstungszahlen brennbarer Flüssigkeiten (2, 11, 35, 49, 53).....	550
Tab. 26: Zersetzungs-, Entflammungs- und Zündtemperaturen ausgewählter Kunststoffe (15, 22, 32, 39, 41, 54, 55)	551
Tab. 27: Temperaturkennwerte der Zündbereitschaft von technischen Erzeugnissen und Naturstoffen (15, 19, 22, 25, 26, 29, 32, 39, 57)	552
Tab. 28: Glimm- und Zündtemperaturen ausgewählter Stäube (46)	554
Tab. 29: Mindestzündenergien von Polystyrenstaub in Abhängigkeit von der Größe der Staubpartikel (15)	554
Tab. 30: Zündtemperaturen von schwebenden und lagernden Stäuben – beachte hierbei die in der Literaturstelle angegebenen Methoden (39)	555
Tab. 31: Gegenüberstellung von Flammpunkten im geschlossenen Tiegel (c.c.) in Luft mit Flammpunkten c.c. in reinem Sauerstoff (6).....	555
Tab. 32: Flammpunkte von festen Stoffen unterhalb der Schmelztemperatur (6).....	555
Tab. 33: Flammpunkte und Zündtemperaturen von in Wasser gelösten brennbaren Flüssigkeiten (39)	556
Tab. 34: Flammpunkt in geschlossenem Tiegel – c.c., in offenem Tiegel – o.c. sowie Brennpunkt (6, 15, 35, 49).....	556
Tab. 35: Heizwerte und Abbrandgeschwindigkeiten brennbarer Stoffe (2, 5, 13, 16, 39, 40)	557
Tab. 36: Flammentemperaturen einiger Brandstoffe bei ihrer Verbrennung in Luft (9, 10, 16, 19, 20, 24, 50)	561
Tab. 37: Maximale Flammenfortpflanzungsgeschwindigkeit V_{FFmax} in Gas- und Dampf-Luft- Gemischen (9, 10)	561
Tab. 38: Flammenfortpflanzungsgeschwindigkeit V_{FF} bei Wasserstoff-Luft-Gemischen (9, 10)	561
Tab. 39: Flammenfortpflanzungsgeschwindigkeit V_{FF} bei Ammoniak-Sauerstoff-Gemischen (9, 10)	561
Tab. 40: Einfluss der Temperatur auf die Flammenfortpflanzungsgeschwindigkeit V_{FF} bei Gas-Luft-Gemischen (9, 10)	562
Tab. 41: Druckabhängigkeit der Flammenfortpflanzungsgeschwindigkeit V_{FF} bei Ethan in Luft und Sauerstoff (9, 10).....	562
Tab. 42: Brandausbreitungsgeschwindigkeit bei Gasen und Flüssigkeiten (2, 16)	562
Tab. 43: Abbrandraten für Bauholz nach DIN 4102-4/A1 : 2004-11 und DIN 4102-22 : 2004-11	563
Tab. 44: Spezifische Abbrandgeschwindigkeit $v_{ab,Spez}$ von Flüssigkeiten bei einem Behälterdurchmesser = 6,2 cm, d. h. bei laminaren Strömungsverhältnissen (16).....	563
Tab. 45: Spezifische Abbrandgeschwindigkeiten $v_{ab,Spez}$ bei großen Brandflächen (2, 5, 40)	564
Tab. 46: Brandverhaltenscharakteristik ausgewählter Kunststoffe (15, 28, 31)	565
Tab. 47: Wärmefreisetzungsrate üblicher Brände (15).....	568
Literatur (Tabellen)	568

Tab. 1: Hauptbestandteile der Luft (3)

Stoff	Anteil in Vol.-%
Stickstoff	78,03
Sauerstoff	20,95
Argon	0,9325
sonst. Edelgase	0,001
Kohlendioxid	0,03
andere Bestandteile	0,003

Tab. 2: Dichten unter Druck verflüssigter Gase (28, 49, 59)

Stoff	Dichte - Flüssigkeit in kg/m³
Wasserstoff	70
Kohlenmonoxid	422
Methan	466
Ethan	509
Propan	500
n-Butan	601
Propen	519
Acetylen (Ethin)	618

Tab. 3: Relative Dampfdichte ausgewählter Stoffe (49)

Stoff	Relative Dichte	Stoff	Relative Dichte	Stoff	Relative Dichte
Acrolein	1,94	Essigsäure	2,07	n-Butan	2,09
Acrylnitril	1,83	Ethan	1,05	Octan	3,95
Ameisensäure	1,59	Ethanol	1,59	Pentan	2,93
Ammoniak	0,596	Ethansäureethylester	3,04	Phenol	3,25
Anilin	3,2	Ethen	1,26	Propan	1,554
Benzen	2,70	Ethin	0,9066	Propanol	2,07
Bleitetraethyl	11,10	Ethylenoxid	1,52	Propanon	2,01
Brommethan	3,76	Furan	2,35	Propen	1,48
Butadien	1,9	Heptan	3,45	Pyridin	2,73
Butanon	2,49	Hexan	2,97	Sauerstoff	1,10
Buttersäure	3,04	Hexanol	3,53	Schwefelwasserstoff	1,188
Chlorbenzen	3,89	Hydrazin	1,11	Stickstoff	0,97
Cyanwasserstoff	1,21	i-Butan	2,113	Styrol	3,6
Decan	4,91	Kohlendisulfid	2,67	Thiophen	2,91
Dichlorbenzen	5,09	Kohlenmonoxid	0,97	Toluen	3,18
Diethylether	2,55	Methan	0,5548	Vinylchlorid	2,16
Dimethylamin	1,52	Methanol	1,1	Wasserstoff	0,07
o-Xylol	3,67	Methylchlorid	1,78	m-Xylol	3,67
Dioxan	3,04				

*) bei 0 °C und Normaldruck

Anmerkung unter Bezug TRBS 2152 Teil 1/TRGS 721: Die Dichte der Dämpfe aller brennbaren Flüssigkeiten ist größer als die der Luft bei gleicher Temperatur. Auch die Dichte von Gasen ist im Allgemeinen größer als die Dichte der Luft (Ausnahmen: z. B. Ammoniak, Cyanwasserstoff, Ethylen, Methan und Wasserstoff). Weiterhin ist zu beachten, dass die Dichte des sich über einer Flüssigkeit bildenden Dampf/Luft-Gemisches durch den temperaturabhängigen Sättampfdruck der Flüssigkeit begrenzt wird. So beträgt z. B. die auf Luft bezogene Dichte (Dichteverhältnis) des Dampfes von Hexan 2,97. Da jedoch Hexan bei 20 °C nur einen Sättampfdruck von 0,16 bar hat, lässt sich die auf Luft bezogene Dichte des sich über der Flüssigkeit bildenden Dampf/Luft-Gemisches wie folgt berechnen: $2,97 \times 0,16 + (1-0,16) = 1,3$. Gase, die leichter als Luft sind, steigen umso schneller nach oben, je geringer ihre Dichte ist; sie vermischen sich hierbei fortschreitend mit Luft.

Die Dichte eines Dampfes oder Gases unter Normalbedingungen (1013 mbar), üblicherweise angegeben in g/cm³ oder kg/m³. Näherungsweise lässt sich die Gas- bzw. Dampfdichte ρ in kg/m³ aus dem idealen Gasgesetz berechnen.

$$\text{Aus } \rho = \frac{m}{V} \quad ; \quad pV = nRT \quad ; \quad m = n \cdot M \quad \text{folgt:}$$

$$\rho = \frac{M \cdot p}{R \cdot T} \cdot 10^{-5} \text{ m}^3 / \text{cm}^3 \quad \left[\frac{1 \text{ g} / \text{mol} \cdot 1 \text{ Pa}}{1 \text{ J} / \text{molK} \cdot \text{K}} \cdot \text{m}^3 / \text{cm}^3 = \frac{1 \text{ g} \cdot 1 \text{ N}}{\text{N}} \cdot 1 / \text{cm}^3 \right]$$

Mit:

ρ	Dichte
m	Masse
M	Molmasse
n	Stoffmenge
p	Druck
R	Ideale Gaskonstante; $R = 8,3144 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$
T	Temperatur
V	Volumen

Tab. 4: Diffusionskoeffizienten D von Gasen und Dämpfen in Luft (14, 28, 36, 49)

Stoff	D in cm ² /s	Stoff	D in cm ² /s
1,2-Dimethylbenzen	0,07	Ethin	0,22
Ammoniak	0,24	Methan	0,16...0,22
Benzen	0,09	Methanol	0,132*
Benzin	0,05	Methansäure	0,131*
Butanol-1	0,068	Methylbenzen	0,08
Diethylether	0,09	Octan	0,054*
Ethanol	0,12	Propanon	0,09
Ethansäurebutylester	0,07	Schwefelkohlenstoff	0,088*
Ethansäureethylester	0,071*	Wasserstoff	0,61
Ethen	0,13		

*) bei 0 °C und Normaldruck

Tab. 5: Eigenschaften von Gasen (2, 13, 15, 29, 33, 36, 42)

Stoff	Formel	Dichte ρ in kg/m ³	Schmelztemperatur θ_{Schmelz} in KJ/kg	Siedetemperatur θ_{Siede} in °C	Verdampfungswärme q_{Verd} in kJ/kg	Wärmekapazität c in kJ/kg K	Wärmeleitfähigkeit λ in W/m K
Acetylen	C ₂ H ₂	1,17	-84	-81	0,021	1,64	0,018 bis 0,022
Ammoniak	NH ₃	0,77	-78	-33	0,024	2,06 bis 2,16	0,022
Argon	Ar	1,78	-189	-186	0,018	0,52	0,0177
Butan	C ₄ H ₁₀	2,70*		-0,6			
Chlor	Cl ₂	3,17				0,47	0,008
Erdgas (flüssig)	> 90 % CH ₄	0,83	-	-162	-	-	-
Ethan	C ₂ H ₆	1,36	-183	-88	0,021	1,66	0,018
Ethylen	C ₂ H ₄	1,26	-140	-30	0,010	1,46	0,017
Frigen R 12	CCl ₂ F ₂	5,51	-140	-30	0,010	-	ca. 0,01
Helium	He	0,18	-272	-269	0,150	5,23	0,143
Kohlendioxid	CO ₂	1,98	-57	-78	0,016	0,82	0,015
Kohlenmonoxid	CO	1,25	-205	-191	0,025	1,05	0,75
Krypton	Kr	3,74	-157	-153	0,010	0,25	0,15
Luft	-	1,1 bis 1,293	-220	-191	0,026	1,0 bis 1,04	0,026
Methan	CH ₄	0,72	-183	-162	0,033	2,19	0,034
n-Butan	C ₄ H ₁₀	2,70	-138	0,5	0,016	>2,27	0,098
Neon	Ne	0,90					
Propan	C ₃ H ₈	2,01	-119,7	-42,1		1,55	0,015
Propen	C ₃ H ₆		-185,2	-47,4			
Sauerstoff	O ₂	1,43				0,91	0,024
Schwefeldioxid	SO ₂	2,86				0,59	0,009
Stickstoff	N ₂	1,25				1,04	0,024
Stickstoffmonoxid	NO	1,34				0,97	0,024
Wasserdampf (100 °C)	H ₂ O	0,60				2,03	0,025
Wasserstoff	H ₂	0,09	-259,1	-252,9		14,05	0,171 bis 0,186

*) bei 0 °C und Normaldruck

Tab. 6: Eigenschaften flüssiger organischer Stoffe (brennbare Flüssigkeiten) (2, 3, 19, 30, 48)

Stoff	Formel	Dichte ρ in $\text{kg/m}^3 \cdot 10^3$	Schmelz- temperatur θ_{Schmelz} in $^{\circ}\text{C}$	Siedetem- peratur θ_{Schmelz} in kJ/kg	Schmelz- wärme q_{Siede} in $^{\circ}\text{C}$	Verdam- pfungswärme q_{verd} in kJ/kg	Wärme- kapazität c in kJ/kg K	Wärmeleit- zahl λ in W/m K
** 2,2,4-Trimethylpentane	iso- C_8H_{18}	0,692	-107,4	99,2				
1,1-Dichlorethen	$\text{C}_2\text{H}_2\text{Cl}_2$			32		307		
1,2-Dichlorethan	$\text{C}_2\text{H}_4\text{Cl}_2$			82		324		
Aceton	$(\text{CH}_3)_2\text{CO}$	0,79	-95	56		523	2,13 bis 2,21	0,16
Acetonitril	$\text{C}_3\text{H}_4\text{CN}$		-45			82		
Aminobenzen	$\text{C}_6\text{H}_7\text{N}$			184		440		
Benzaldehyd	$\text{C}_7\text{H}_6\text{O}$		-95	179		335		
Benzol	C_6H_6	0,88	6	80	151	394	1,70	0,15
Benzylalkohol	$\text{C}_7\text{H}_{10}\text{O}$			204		467		
Butanol-1	$\text{C}_4\text{H}_{10}\text{O}$			117		595		
Chlorbenzen	$\text{C}_6\text{H}_5\text{Cl}$			132		323		
Cyanwasserstoff	HCN			26		935		
Cyclohexan	C_6H_{12}			81		365		
Cyclohexanol	$\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}$		22,5			161		
Decansäure	$\text{C}_{10}\text{H}_{20}\text{O}_2$		32					
Dieselmotortreibstoff	-	0,82 bis 0,86	-10 bis -30	180 bis 360		250	2,05	0,15
Diethylamin	$(\text{C}_2\text{H}_5)_2\text{NH}_2$			58		381		
Diethylether	$(\text{C}_2\text{H}_5)_2\text{O}$		-116	35	100	360		
Dodecanol-1	$\text{C}_{12}\text{H}_{26}\text{O}$		23,8					
Erdöl							1,884	
Ethandiol	$\text{C}_2\text{H}_6\text{O}_2$	1,056		197		800	2,74	0,26
Ethanol	$\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$	0,789	-117,3	78	105	1017	2,43	0,18
Ethansäure	$\text{C}_2\text{H}_4\text{O}_2$			118		406		
Ethansäure-ethylester	$\text{C}_4\text{H}_8\text{O}_2$			77		366		
Ethansäure-propylester	$\text{C}_5\text{H}_{10}\text{O}_2$			100		336		
Ethylen (Ethen)	C_2H_4	0,384	-169,1	-103,7				
Flugmotortreiböl (60 °C)		0,87					2,01	0,14

Fortsetzung Tab. 6:
Eigenschaften flüssiger organischer Stoffe (brennbare Flüssigkeiten) (2, 3, 19, 30, 48)

Stoff	Formel	Dichte ρ in $\text{kg/m}^3 \cdot 10^3$	Schmelz- temperatur θ_{Schmelz} in °C	Siedetem- peratur θ_{Schmelz} in kJ/kg	Schmelz- wärme Q_{Siede} in °C	Verdam- pfungswärme Q_{Ved} in kJ/kg	Wärme- kapazität c in kJ/kg K	Wärmeleit- zahl λ in W/m K
Frostschutzmittelmischung 54 Vol. %	-	1,06	-46	105	-	-	3,43	0,40
Frostschutz- mittelmischung 38 Vol. %	-	1,04	-25	103	-	-	3,68	0,45
Frostschutz- mittelmischung 23 Vol. %	-	1,03	-12	101	-	-	3,94	0,53
Glycerin wasserfrei	$\text{C}_3\text{H}_8(\text{OH})_3$	1,26	19	290	201	825	2,37 bis 2,43	0,27 bis 0,29
Heizöl	-	0,83	-10	175	-	>278	2,07	0,14
Heizöl (Erdölbasis, Sorte S, bei 80 °C)	-	0,91	-	-	-	-	2,04	0,12
Methanol	CH_3OH	0,79	-94	65	-	1110	2,51	0,20
Methansäure	CH_3O_2	-	-	100	-	503	-	-
Mineral-Schmieröl	-	0,91	-20	300	-	>250	2,09	0,13
n-Decan	$n\text{-C}_{10}\text{H}_{22}$	0,730	-29,7	174,1	-	-	-	-
n-Heptan	$n\text{-C}_7\text{H}_{16}$	0,684	-90,6	98,4	-	326	-	-
n-Hexan	$n\text{-C}_6\text{H}_{14}$	0,660	-95	69,0	-	-	-	-
n-Nonan	$n\text{-C}_9\text{H}_{20}$	0,718	-51	150,8	-	-	-	-
n-Octan	$n\text{-C}_8\text{H}_{18}$	0,703	-56,8	125,7	-	-	-	-
Normalbenzin	-	0,72 bis 0,77	-30 bis -50	25 bis 215	-	380 bis 500	2,02	0,13
n-Pentan	$n\text{-C}_5\text{H}_{12}$	0,626	-129,7	36,7	-	358	-	-
o-Cresol	$\text{C}_7\text{H}_8\text{O}$	-	31	-	-	-	-	-
Petroleum	-	0,76 bis 0,86	-70	150	-	314	2,16	0,13
Siliconöl (AK 250)	-	0,97	-	-	-	-	1,47	0,17
Superbenzin	-	0,73 bis 0,78	-30 bis -50	25 bis 215	-	>317	ca. 2,0	ca. 0,13
Terpentinöl	-	0,853 bis 0,867	-10	155,180	-	293	1,72 (bei 0 °C)	0,14 (bei 0 °C)
Tetraalin	-	-	-	207	-	333	-	-
Toluol	C_7H_8	0,87	-95	111	72	363	1,70	0,14
Transformatoren-öl (60 °C)	-	0,84	-	-	-	-	2,09	0,12
Trichlormethan	CHCl_3	1,49	-	-	-	-	0,98	0,12

*) beide Kennzahlen bei 1013 bar bestimmt, Verdampfungswärmen beziehen sich auf den Siedepunkt

Tab. 7: Eigenschaften anorganischer Stoffe – Metalle und Übergangsmetalle sowie Metalllegierungen (15, 17, 28, 51, 56)

Stoff	chem. Kurzzeichen	Dichte ρ in $\text{kg/m}^3 \cdot 10^3$	Schmelztemperatur T_{Schmelz} in °C	Schmelzwärme Q_{Schmelz} in kJ/kg	Siedetemperatur T_{Siede} in °C	Verdampfungswärme Q_{verd} in kJ/kg	Wärmekapazität c in kJ/kg K	Wärmeleitfähigkeit λ in W/m K
Aluminium	Al	2,70	660	396	2270	10878	0,89 bis 0,95	211 bis 238
Antimon	Sb	6,69	630,5	163	1635	1028	0,21	22
Barium	Ba	3,59	704	55	1700	1098	0,29	-
Beryllium	Be	1,85	1280	1360	2470	33990	1,892	201
Blei	Pb	11,3	327,4	24	1751	867	0,13	35
Blei (bei 400 °C)	Pb	1,06					0,15	15
Bor	B	2,30 bis 2,34	2180	2090	3700	35000	1,03 bis 1,047	
Bronze (6Sn 9Zn 84Cu 1Pb)		8,8					0,38	62
Cadmium	Cd	8,64	321	54	765	891	0,23	91
Calcium	Ca	1,54	850	329	1400	3825	0,66	-
Chrom	Cr	7,1	1800	134	2700	6711	0,44 bis 0,46	69
Chromnickel	-	7,4	1440	-	2300	-	0,46	52,2
CuAl-Legierung	-	7,6	1040	-	2300	-	0,44	61
CuSn-Legierung	-	7,4 bis 8,9	900	-	2300	-	0,38	46
CuZn-Legierung	-	8,4 bis 8,7	900 bis 1000	168	2300	-	0,39	105
Duraluminium (94-96 Al 3-5 Cu 0,5 Mg)		2,7					0,91	142 bis 165
Eisen, rein	Fe	7,87	1530	276	3070	6338	0,47	81
Germanium	Ge	5,3	936	409	2700	4601	0,31	55
Gold	Au	19,29	1063	67	2960	1769	0,13	295 bis 310
Gusseisen	-	7,25 bis 7,4	1200	125	2500	-	0,5 bis 0,54	58
Hartmetall	-	14,8	2000	-	4000	-	0,80	81,4

Fortsetzung Tab. 7: Eigenschaften anorganischer Stoffe – Metalle und Übergangsmetalle sowie Metalllegierungen (15, 17, 28, 51, 56)

Stoff	chem. Kurzzeichen	Dichte ρ in $\text{kg/m}^3 \cdot 10^3$	Schmelztemperatur T_{Schmelz} in °C	Schmelzwärme Q_{Schmelz} in kJ/kg	Siedetemperatur T_{Siede} in °C	Verdampfungswärme Q_{verd} in kJ/kg	Wärmekapazität c in kJ/kg K	Wärmeleitfähigkeit λ in W/m K
Iridium	In	7,3	156	28	2000	1982	0,23	24,4
Iridium	Ir	22,5	2454	135	4350	3186	0,13	59
Kallium	K	0,86	64	61	760	1982	0,78	110
Kobalt	Co	8,8	1490	268	3100	5922	0,43	69,1
Konstantan (55 Cu 44 Ni 1 Mn)	-	8,89	1260	-	2400	-	0,41	23
Kupfer	Cu	8,93 bis 8,96	1083	213	2567	4752	0,39 bis 0,42	372 bis 401
Lithium	Li	0,534	180	670	1370	21340	3,60	65
Magnesium	Mg	1,74	650	368	1110	5423	1,04	160
Magnesium-Legierung	-	1,8 bis 1,83	630	-	1500	-	1,00	46 bis 139
Mangan	Mn	7,43	1244	251	2095	4095	0,48	21
Messing - MS 58 (Cu 30Zn 3Pb)	-	8,44	900 bis 920	-	-	-	0,38	113
Molybdän	Mo	10,2	2600	287	5500	6191	0,26	145
Natrium	Na	0,97	97,8	113	883	4260	1,30	128
Nickel	Ni	8,9	1452	306	2730	6483	0,45	59
Osmium	Os	22,5	2500	146,5	5300	3938	0,13	-
Palladium	Pd	12,0	1555	162	2930	3318	0,23	71
Platin	Pt	21,5	1769	113	4300	2616	0,13	70
Quecksilber	Hg	13,62	- 39	12	357	300	0,138	8,65
Radium	Ra	5	960	-	1140	509	-	-
Rhenium	Re	21	3180	20	5500	3797	0,14	71
Rubidium	Rb	1,52	39	-	701	887	0,33	58
Selen rot	Se	4,4	220	83	688	-	0,33	0,2
Silber	Ag	10,5	961,5	105	2180	2355	0,23	408 bis 418
Silizium	Si	2,33	1420	1658	2355	14031	0,75	83
Stahl – nicht magnetisierbar	-	8	1450	-	-	-	-	16,4

Fortsetzung Tab. 7: Eigenschaften anorganischer Stoffe – Metalle und Übergangsmetalle sowie Metalllegierungen (15, 17, 28, 51, 56)

Stoff	chem. Kurzzeichen	Dichte ρ in $\text{kg/m}^3 \cdot 10^3$	Schmelztemperatur T_{Schmelz} in °C	Schmelzwärme q_{Schmelz} in kJ/kg	Siedetemperatur T_{Siede} in °C	Verdampfungswärme q_{Verd} in kJ/kg	Wärmekapazität c in kJ/kg K	Wärmeleitfähigkeit λ in W/m K
Stahl (0,1% C)		7,83 (bei 100 °C)					0,47 (bei 100 °C)	52 (bei 100 °C)
Stahl nichtrostend	-	7,9	1450	-	-	-	0,51	14
Stahl unlegiert und niedrig legiert	-	7,85	1460	205	2500	-	0,49	48 bis 58
Stahl wolframlegiert	-	8,7	1450	-	-	-	0,42	26
Stahl (V2 bzw. V2A)	-	8,0					0,48	15
Strontium	Sr	2,6	771	136	1366	1585	0,75	-
Tantal	Ta	16,6	2990	172	5400	4115	0,14	54
Tellur	Te	6,24	455	106	1300	2296	0,20	4,9
Thorium	Th	11,7	1700	67	4000	2341	0,14	38
Titan	Ti	4,54	1670	88	3280	8560	0,47	15,5
Uran	U	19,1	1133	356	3800	1731	0,12	28
Vanadium	V	6,1	1890	343	3300	10758	0,50	31,4
Widerstandslegierung – Isotan(Cu 44Ni 1Mn)	-	8,9	1280	-	2400	-	0,41	22,6
Wismut	Bi	9,8	271	58	1560	847	0,12	8,1
Wolfram	W	19,2	3400	193	5660	4399	0,14	180
Zink	Zn	7,14	419,5	101	907	1755	0,40	113
Zinn	Sn	232	232	60	2362	2400		
Zinn weiß	Sn	7,23	231,9	59	2600	3245	0,23	63

Tab. 8: Eigenschaften anorganischer Stoffe – Nichtmetalle und technische Produkte (14, 17, 28 ,51, 56)

Stoff	chem. Kurzzeichen	Dichte ρ in $\text{kg/m}^3 \cdot 10^3$	Schmelztemperatur θ_{Schmelz} in °C	Schmelzwärme q_{Schmelz} in kJ/kg	Siedetemperatur θ_{Siede} in °C	Verdampfungswärme q_{verd} in kJ/kg	Wärmekapazität c in kJ/kg K	Wärmeleitfähigkeit λ in W/m K
α -Aluminiumoxid	Al_2O_3	3,98	2053				0,745	
Asbest	-	2,1 bis 2,8	1300	-	-	-	0,81 bis 1,05	0,15
Asbestgewebe		0,55	1150		1550			0,18
Basalt	-	3,0	-	-	-	-	0,86	1,7
Beton	-	1,8 bis 2,2	-	-	-	-	0,88	0,83 bis 1,39
Diamant	C	3,5	Bei Normaldruck Umwandlung in Graphit	-	Bei Normaldruck Umwandlung in Graphit	-	0,52	20
Eis (bei 0 °C)	-	0,92	0	333	100	2258	2,093)	2,33
Gips	-	2,3	1200				2,02	0,35 bis 0,44
Gipsputz		1,44					0,840	0,48
Glas	-	2,4 bis 2,7	700	-	-	-	0,7 bis 0,83	0,55 bis 1,16
Fensterglas		2,48					0,70 bis	0,84 bis 1,16
Glasfaserstoff		0,03 bis 0,2	700				0,66	0,042
Glimmer	-	2,6 bis 2,9	zerfällt bei 700°C	-	-	-	0,87	0,35
Granit	-	2,5 bis 2,7	-	-	-	-	0,75	2,9 bis 3,5
Graphit	C	2,0 bis 2,24	> 2500 plastisch verformbar	-	>3750 Sublimation	-	0,61 bis 0,71	22 bis 168
Jod	J	5,0	113,6	62	183	-	0,23	-
Kalkstein	-	2,7	-	-	-	-	-	-
Kies (trocken)	-	2,0	-	-	-	-	-	-
Kohlenstaub		0,73 (30 °C)						
Korund	-	3,9 bis 4,0	2050	-	2700	-	1,30 (30 °C)	0,12 (30 °C)
Magnesiumoxid	MgO	3,4	Ca. 2830	-	3600	-	0,96	12,23
							0,923	

Fortsetzung Tab. 8: Eigenschaften anorganischer Stoffe – Nichtmetalle und technische Produkte (14, 17, 28 ,51, 56)

Stoff	chem. Kurzzeichen	Dichte ρ in $\text{kg/m}^3 \cdot 10^3$	Schmelztemperatur θ_{Schmelz} in °C	Schmelzwärme q_{Schmelz} in kJ/kg	Siedetemperatur θ_{Siede} in °C	Verdampfungswärme q_{Verd} in kJ/kg	Wärmekapazität c in kJ/kg K	Wärmeleitfähigkeit λ in W/m K
Marmor		2,5 bis 2,80	1290	22	-	1675	0,80	2,08 bis 3,5
Phosphor (weiß)		44	44		280			-
Porzellan	-	2,3 bis 2,5	1600	-	-	-	1,24	1,6
Quarz Flint	-	2,1 bis 2,5	1480	-	2230	-	0,73 bis 0,8	9,9
Ruß	-	1,7 bis 1,8	-	-	subl. 3540	-	0,84	0,07
Sand (feucht)	-	1,9..2,1	-	-	-	-	-	-
Sand, trocken	-	1,2 bis 1,60	1480	-	2230	-	-	0,4 bis 0,61
Sandstein	-	2,2 bis 2,50	1500	-	-	-	0,71	1,89 bis 2,3
Schiefer	-	2,6 bis 2,7	-	-	2000	-	-	2,14
Schwefel rhombisch	S	2,07	113	49	344,6	300	0,72	0,2 bis 0,27
Schlackenwolle		0,2 (25 °C)					0,80 bis 0,92 (25 °C)	0,05 (25 °C)
Schwefelkohlenstoff			- 112	74	46	373		
Siliziumkarbid	-	2,4	Zerfällt bei >3000°C in C und Si	-	1,05	-	61	9
Steatit (Speckstein – Mg-Silikat)	-	2,6 bis 2,7	-1520	-	-	-	0,83	1,67)
Ton trocken	-	1,5 bis 1,8	1600	-	-	-	0,88	0,9 bis 1,3
Wasser	-	0,998	0	334	100	2257	4,187 (bei 14,5°C)	0,60
Zement abgebunden	-	2 bis 2,2	-	-	-	-	1,13	0,9 bis 1,2
Ziegel, trocken		1,4 bis 1,8	-	-			0,84	0,47 bis 0,58

Tab. 9: Schmelzpunkte einiger oxydierend wirkender Stoffe (3, 40, 56)

Stoff	Schmelzpunkt in °C
Ammoniumnitrat	169 - anschließend Zerfall bei vorsichtiger Erwärmung
Bariumperoxid	450 - oberhalb 700 °C Zersetzung
Calciumnitrat - wasserfrei	561
Kaliumchlorat	370 - anschließend Zersetzung bei vorsichtiger Erwärmung
Kaliumnitrat	334 - oberhalb 400 °C Zersetzung
Kaliumperchlorat	610 - oberhalb 400 °C beginnt Zersetzung
Natriumchlorat	248 bis 261
Natriumnitrat	307 - oberhalb 600 °C Zersetzung
Natriumperchlorat	130 - oberhalb 482 °C Zersetzung
Natriumperoxid	660 - oberhalb 750 °C Zersetzung

Tab. 10: Eigenschaften ausgewählter brennbarer technischer Produkte (15, 17, 51, 56)

Stoff	Dichte ρ in $\text{kg/m}^3 \cdot 10^3$	Schmelz- temperatur θ_{Schmelz} in °C	Schmelz- wärme q_{Schmelz} in kJ/kg	Siede- temperatur θ_{Siede} in °C	Verdampfungs- wärme q_{Verd} in kJ/kg	Wärme- kapazität c in kJ/kg K	Wärmeleitzahl λ in W/m K
Baumwolle	0,081	-	-	-	-	1,15 bis 1,3	0,07
Fette	0,92 bis 0,94	30 bis 175	-	300	-	0,63 bis 0,8	0,21
Holz	0,2 bis 0,7	-	-	-	-	2,50	0,06 bis 0,17
Balsaholz	0,13	-	-	-	-	-	0,05
Birke*	0,65	-	-	-	-	-	0,42
Buche*	0,73	-	-	-	-	-	0,36
Buchenholz (längs der Faser, 20% Feuchte)	0,6	-	-	-	-	2,40	0,17
Eiche*	0,7	-	-	-	-	-	0,17 bis 0,39
Eichenholz (radial)	0,8	-	-	-	-	1,76 bis 2,38	0,20
Fichtenholz (radial)	0,41	-	-	-	-	2,70	0,14
Kiefer*	0,52	-	-	-	-	-	0,28
Kiefer (Pinus ponderosa)	0,64	-	-	-	-	2,85	0,14
Pappel	0,45	-	-	-	-	-	-
Tanne*	0,47	-	-	-	-	-	0,22
Holzfasierplatten	-	-	-	-	-	-	0,06
Holzkohle	0,28 bis 0,5	-	Siehe Graphit	Siehe Graphit	Siehe Graphit	1,16	1,09
Holzwohle	-	-	-	-	-	-	0,093
Holzwohle- Leichtbauplatten	0,4	-	-	-	-	-	0,097
Koks	1,6 bis 1,9	-	-	-	-	0,83	0,18
Kork	0,1 bis 0,3	-	-	-	-	1,5 bis 2,1	0,4 bis 0,6
Korkkrümel- Schüttung	0,045	-	-	-	-	-	0,04

Fortsetzung Tab. 10: Eigenschaften ausgewählter brennbarer technischer Produkte (15, 17, 51, 56)

Stoff	Dichte ρ in $\text{kg/m}^3 \cdot 10^3$	Schmelz- temperatur θ_{Schmelz} in °C	Schmelz- wärme q_{Schmelz} in kJ/kg	Siede- temperatur θ_{Siede} in °C	Verdampfungs- wärme q_{Verd} in kJ/kg	Wärme- kapazität c in kJ/kg K	Wärmeleit- zahl λ in W/m K
Korkplatten	0,19 (bei 30°C)					1,88 (bei 30 °C)	0,04 (bei 30 °C)
Leder (trocken)	0,86					1,50	0,12
Naphthalin	1,02 bis 1,25	80	147	218	314	1,3	
Papierlagen	0,7					1,20	0,12
Paraffin	0,87 bis 0,9	52	-	300	-	2,9 bis 3,27	0,24 bis 0,26
Sägespäne	0,2					-	0,07
Stearin		70	201	380	234		
Steinkohle	1,2 bis 1,35	-	-	-	-	1,02 bis 1,2	0,24 bis 0,26
Vulkanfaser	1,33					1,20	0,30
Wachs	0,96	60	-	-	-	3,40	0,084
Wellpappe	-					-	0,06
Wolle	0,1					1,72	0,04
Wollfilz	0,33					-	0,05
Zucker	1,6 (bei 0 °C)					1,25 (bei 0 °C)	0,58 (bei 30 °C)

*Holzfeuchtigkeit - 12 % (Wärmeleitfähigkeit axial)

Tab. 11: Eigenschaften ausgewählter organischer Feststoffe¹⁾ (3, 14, 30, 39)

Stoff	Dichte ρ in $\text{kg/m}^3 \cdot 10^3$	Schmelztemperatur θ_{Schmelz} in °C	Schmelz- wärme q_{Schmelz} in kJ/kg	Siedetemperatur θ_{Siedes} in °C	Verdampfungs- wärme q_{Verd} in kJ/kg	Wärme- kapazität c in kJ/kg K	Wärmeleitzahl λ in W/m K
Adipinsäure	1,37	153		265			
Benzensulfonamid		156					
Benzoesäure	1,27	122		250			
Bernsteinsäure	1,56	185		235			
Biphenyl	1,04	69		255			
Chloralhydrat	1,91	51					
Citronensäure	1,665	153					
Cyanamid	1,07	46	180	132 bis 138 (16 hPa)		-	-
Fructose	1,59	103					
D-Glucose		146					
Glycolsäure		78					
Harnstoff	1,34	133					
Hydrochinon	1,36	172		286			
Lactose	1,525	202					
Maleinsäure	1,59	131					
Naphthalin	1,14	80,04		218			
o-Nitrophenol	1,49	45	93	217	392 aus fest	-	-
Oxalsäure	1,90	189,5					
Phenol	1,07	40,8	162	181,8	511	1,16 fest	-
Phthalsäureanhydrid	1,53	131		285			
Pikrinsäure	1,76	122					
p-Nitrophenol	1,48	114					
Saccharose	1,74	185					
Salicylsäure	1,443	158		211			
Thioharnstoff	1,405	176 ... 178					
o,o'-Tricresylphosphat	1,18	11		410			
Weinsäure	1,76	168 ... 172					

1) die meisten Stoffe mit höherem Schmelzpunkt zersetzen sich schon deutlich bei längerem Erwärmen im Bereich des Schmelzpunktes

Tab. 12: Eigenschaften von hochpolymeren Stoffen (Kunststoffe)
(7, 8, 12, 15, 17, 18, 36, 37, 38, 42, 45, 51, 56, 59)

Stoff	Dichte ρ in $\text{kg/m}^3 \cdot 10^3$	Schmelz- temperatur (bereicht) θ_{Schmelz} in °C	Schmelz- wärme q_{Schmelz} in kJ/kg	Siede- temperatur θ_{Siede} in °C	Verdampfungs- wärme Q_{Verd} in kJ/kg	Wärme- kapazität c in kJ/kg K	Wärmeleitzahl λ in W/m K
Aminoplast	1,5					1,67	0,35
Anilinpressharz	1,2					1,67	0,12
Celluloseacetat		170 bis 190				1,9	
Cellulosenitrat (Celluloid)	1,38						0,23
cis-1,4-Polyisopren		128	4400				
Glasfaserverstärker	1,4 bis 1,7					0,85 bis 1,25	0,041
Kunststoff							
Hartgummi	1,15					1,42	0,16
Phenolharz ohne Füllstoff	1,28 bis 1,3					1,47	0,17 bis 0,2
Poly(decamethylen)- terephthalat		138	46000				
Polyacrylnitril		317	5088				
Polyamid	1,1					1,75	0,31
Polyamid 6		215 bis 220	21620				
Polyamid 66	1,14	220 bis 225				1,90	0,291
Polyamid 66 (30 % glasfaserverstärkt)	1,35					1,26	0,232
Polycarbonat	1,2	220 bis 230				1,17 bis 1,45	0,19 bis 0,221
Polyethylen	0,94	137	7940				0,41
Polyethylen-HD	0,95	105 bis 115				2,2..2,7	0,38 bis 0,51
Polyethylen-LD	0,914 bis 0,928	125 bis 130				1,9 bis 2,5	0,32 bis 0,4
Polyethylenterephthalat	1,34 bis 1,38	250 bis 265	2265			1,2 bis 1,47	0,15 bis 0,40
Polyimid	1,43					1,09	0,1 bis 0,35
Polyisobutylen	0,91					1,80	0,20 bis 0,27
Polyethyl-metacrylat	1,17 bis 1,20	145 bis 170				1,47	0,18 bis 0,19
Polyoxymethylen	1,4					1,5	0,19 bis 0,28
Poly-p-phenylen		>500					
Polypropylen	0,91	160 bis 176	10880			1,65 bis 1,9	0,1 bis 0,22
Polystyrol	1,05	235 bis 250	8320			1,2 bis 1,35	0,1 bis 0,17
Polystyrolschaum						1,25	0,028 bis 0,032
Polysyrol-Hartschaum hart	0,013 bis 0,03						0,025 bis 0,04

Fortsetzung Tab. 12: Eigenschaften von hochpolymeren Stoffen (Kunststoffe)
(7, 8, 12, 15, 17, 18, 36, 37, 38, 42, 45, 51, 56, 59)

Stoff	Dichte ρ in $\text{kg/m}^3 \cdot 10^3$	Schmelz- temperatur (bereich) θ_{Schmelz} in $^{\circ}\text{C}$	Schmelz- wärme q_{Schmelz} in kJ/kg	Siede- temperatur θ_{Sieds} in $^{\circ}\text{C}$	Verdampfungs- wärme q_{Verd} in kJ/kg	Wärme- kapazität c in kJ/kg K	Wärmeleitzaahl λ in W/m K
Polytetrafluorethylen	2,1 bis 2,2	327 bis 400	5720			1,0	0,25
Polytrifluorochlorethylen		211 bis 216	4988				
Polyurethan (Spritzguss- masse)	1,2					1,88	0,29
Polyurethan-Hartschaum	0,02 bis 0,025					1,40	0,02 bis 0,035
Polyvinyl- chlorid-weich	1,16 bis 1,35					0,9 bis 1,8	0,15
Polyvinyl- chlorid-hart	1,38 bis 1,55					0,85 bis 0,9	0,12 bis 0,17
Polyvinylcarbazol	1,2					1,25	0,26
Polyvinylchlorid-hart	1,4	160 bis 180				0,95	0,14 bis 0,186
Polyvinylchlorid (schlagzäh)	1,35					1,15	0,14 bis 0,186
Polyvinylchlorid-weich	1,38 bis 1,4	75 bis 80				-	0,165
Polyvinylidenchlorid	1,87	170 bis 190				1,34	0,12
Schaumgummi	0,4					1,67	0,07
Schaumgummi	0,06 bis 0,25						0,04 bis 0,06
Schaumkunststoff	0,01 bis 0,06						0,033 bis 0,058
Siliconharz (ungefüllt)	0,87						0,22
trans-1,4-Polyisopropen		174				1,10	
Vulkanfaser	1,28		12700				0,3

Tab. 13: Kurzzeichen und Namen wichtiger Kunststoffe – in Anlehnung an DIN 7728, Teil 1

ABS	Acrylnitril-Butadien-Styrol	PE/HD	Polyethylen hoher Dichte (Hart-PE)
A/MMA	Acrylnitril-Methylmethacrylat	PE/LD	Polyethylen niedriger Dichte (Weich-PE)
ASA	Acrylnitril-Styrol-Acrylester	PE-C	chloriertes Polyethylen
BR	Butadienkautschuk	PETP	Polyethylenterephthalat
CA	Zelluloseacetat	PF	Phenol-Formaldehyd
CAB	Zelluloseacetobutyrat	PI	Polyimid
CF	Kresol-Formaldehyd	PIB	Polyisobutylen
CMC	Carboxymethylcellulose	PMMA	Polymethylmethacrylat
CO	Epichlorhydrinkautschuk	POM	Polyoxymethylen, Polyacetal
CP	Zellulosepropionat	PP	Polypropylen
CR	Chloroprenkautschuk	PPE	Polyphenylenether
CMS	Chlorsuloniertes Polyethylen	PPS	Polyphenylsulfid
DAP	Diallylphthalat	PS	Polystyrol
EC	Ethylcellulose	PTFE	Polytetrafluorethylen
EP	Epoxid	PUR	Polyurethan
EPS	expandierbares Polystyrol	PVAC	Polyvinylacetat
EVA	Ethylen-Vinylacetat-Copolymer	PVAL	Polyvinylalkohol
EVAL	Ethylen-Vinylalkohol	PVC	Polyvinylchlorid
FEP	Tetrafluorethylen-Hexafluorpropylen	PVDC	Polyvinylidenchlorid
MBS	Methylmethacrylat-Butadien-Styrol	PVDF	Polyvinylidenfluorid
MC	Methylcellulose	PVK	Polyvinylcarbazol
MF	Melamin-Formaldehyd	PVP	Polyvinylpyrrolidon
PA	Polyamid	Q	Silikonkautschuk
PA 6	Polymeres aus e-Caprolactam	SAN	Styrol-Acrylnitril
PA 66	Polykondensat aus Hexamethylendiamin u. Adipinsäure	SB	Styrol-Butadien-Copolymer modifiziert
PAN	Polyacrylnitril	SBR	Styrol-Butadien-Kautschuk
PB	Polybuten	Si	Silicon
PBTP	Polybutylenterephthalat	TM	Thioplaste
PC	Polycarbonat	UF	Harnstoff-Formaldehyd
PC/TFE	Polychlorotrifluorethylen	UP	ungesättigte Polyester
PE	Polyethylen		

Tab. 14: Wärmeleitfähigkeit von ausgewählten Bau- und Dämmstoffen
 Auszug aus DIN 4108, Teil 4

Stoff	Rohdichte in kg/m ³	Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit in W/m K
Bauplatten		
Beläge, Abdichtungsstoffe und Abdichtungsbahnen		
Bitumendachbahnen und nackte Bitumenbahnen n. DIN 52128	(1200)	0,17
Buche, Eiche	(800)	0,20
Dampfgehärteter Porenbeton nach DIN 4223	400 bis 800	0,14 bis 0,23
Fichte, Kiefer, Tanne	(600)	0,13
Gipskartonplatten	(900)	0,25
Gipsmörtel, Kalkgipsmörtel	(1400)	0,70
Gipsputz ohne Zuschlag	(1200)	0,35
Glas	(2500)	0,80
Harte Holzfaserplatten	(1000)	0,17
Holzfaserdämmplatten nach DIN 68755	(120 bis 450)	0,040 bis 0,070
Holzspan-Flachpreßplatten	(700)	0,13
Holzwohle-Leichtbauplatten Plattendicke d > 25 mm	(360 bis 460)	0,065 bis 0,090
Kunstharzputz	(1100)	0,70
Kunststoffbeläge z.B. PVC	(1500)	0,23
Leichtbeton haufwerksporig mit nichtporigen Zuschlägen	1600 bis 2000	0,81 bis 1,4
Leichtbeton haufwerksporig mit porigen Zuschlägen	600 bis 2000	0,22 bis 1,2
Leichtbeton und Stahlleichtbeton	800 bis 2000	0,39 bis 1,6
Leichtlochziegelmauerwerk mit Lochung A und B	700 bis 1000	0,36 bis 0,45
Linoleum nach DIN EN 548	(1000)	0,17
Lose Schüttungen aus porigen Stoffen	(< 100) bis < 1500	0,060 bis 0,27
Lose Schüttungen aus Sand, Kies, Splitt (trocken)	(1800)	0,70
Mauerwerk aus Kalksandsteinen	1000 bis 2200	0,50 bis 1,3
Metalle	-	15 bis 380
Mineralische und pflanzliche Faserdämmstoffe	(8 bis 500)	0,035 bis 0,050
Normalbeton	2200 bis 2400	1,6 bis 2,1
Polystyrol-Extruder Schaum	(> 25)	0,030 bis 0,040
Polystyrol-Partikelschaum	> 15	0,035 bis 0,040
Polyurethan-Hartschaum	(> 30)	0,020 bis 0,040
Porenbetonbauplatten	400 bis 800	0,20 bis 0,29
Poröse Holzfaserplatten	< 400	0,070
Putze, Mörtel, Estriche, Kalkmörtel, Kalkzementmörtel	(1800)	0,87
Schaumglas nach DIN 18174	(100 bis 150)	0,045 bis 0,060
Sperrholz	(800)	0,15
Vollklinker-, Hochlochklinker-, Keramikklinker-mauerwerk	1800 bis 2200	0,81 bis 1,2
Vollziegel-, Hochlochziegelmauerwerk	1200 bis 2000	0,50 bis 0,96
Wandbauplatten aus Gips	600 bis 1200	0,29 bis 0,58
Wandbauplatten aus Leichtbeton	800 bis 1400	0,29 bis 0,58
Wärmedämmputz nach DIN 18550-3	(> 200)	0,060 bis 0,100
Wärmedämmstoffe,		
Zementmörtel, Zementestrich	(2000),	1,40

Die in Klammern angegebenen Werte der Rohdichte dienen nur zur Ermittlung der flächenbezogenen Masse, z.B. für den Nachweis des sommerlichen Wärmeschutzes.

Tab. 15: Absorptionsgrad ausgewählter Stoffe (1, 23, 47)

Material	Temperatur des strahlenden Körpers in °C	Emissionsverhältnis = Absorptionsgrad
Aluminium (poliert)	220 bis 557	0,04
Aluminium (rauh)	26	0,055
Aluminium, oxidiert		0,8
Aluminium, roh		0,07 - 0,087
Aluminium, stark oxidiert		0,24
Aluminiumlack		0,034 - 0,42
Aufgedampfter Silberspiegel		0,02
Beliebige Ölfarben (auch weiß), Lithopone		0,88 - 0,97
Blei, grau oxidiert		0,28
Dachpappe	25	0,78
Dachpappe		0,91
Edle Metalle		0,016 - 0,05
Eichenholz (gehobelt)	20	0,9
Eichenholz, gehobelt		0,89
Eis, glatt, dicker als 0,1 mm		0,91
Eisen (frisch geschmirgelt)	20	0,24
Eisen (glatt, oxydiert)	125 bis 525	0,8
Eisen, Stahl, ganz verrostet		0,69
Eisen, Stahl, matt verzinkt		0,087
Eisen, Stahl, roh mit Walzhaut oder Gußhaut		0,75 - 0,81
Eisen, Stahl, verzinkt		0,22 - 0,28
Elektrolytkupfer (Hochglanz)	80 bis 115	0,02
Emallelack, schneeweiß		0,91
Gips		0,95
Glas (glatt)	22	0,19
Glas, glatt		0,95
Gummi, weich		0,87
Hartgummi (gewachste Oberfläche)	23	0,95
Hartgummi, glatt, schwarz		0,93
Kachel, weiß glasiert		0,87
Kerzenruß	95 bis 270	0,95
Kohle		0,81
Kupfer (bei 600 °C oxydiert)	200 bis 600	0,6 bis 0,9
Kupfer, geschabt		0,093
Kupfer, schwarz oxidiert		0,77
Lack, schwarz glänzend auf Metallplatte	25	0,875
Lack, weiß	40 bis 95	0,960 bis 0,980
Marmor (grau, poliert)	22	0,93
Marmor, hellgrau, poliert		0,85
Mauerstein rot, rauh	22	0,93
Messing, brüniert		0,42
Messing, frisch geschmirgelt		0,14

Fortsetzung Tab. 15: Absorptionsgrad ausgewählter Stoffe (1, 23, 47)

Material	Temperatur des strahlenden Körpers in °C	Emissionsverhältnis = Absorptionsgrad
Messing, rohe Walzfläche		0,068
Nichtedle Metalle		0,026 - 0,07
Öl		0,93
Papier (aufgeklebt auf Metallplatte)	19	0,92
Ruß-Wasserglas (Rubens-Hoffmann) 100 °C		0,96
Schellack (schwarz, matt)	75 bis 145	0,91
Schmelzemaille, weiß		0,91
Spirituslack, schwarz glänzend		0,83
Wasser	0 bis 100	0,95 bis 0,96
Weichgummi (grau, raue Oberfläche)	24	0,9
Weißlack	40 bis 95	0,8 bis 0,95

für grau (also mit frequenzunabhängigem Emissionsgrad) strahlende Oberflächen ist der gerichtete Gesamtabsorptionsgrad gleich dem gerichteten Gesamtemissionsgrad und dem gerichteten spektralen Emissionsgrad:

$$a'(\beta, \varphi, T) = \varepsilon'(\beta, \varphi, T) = \varepsilon'_\nu(\beta, \varphi, T)$$

Tab. 16: Absorptionsgrad ausgewählter Baustoffe (23, 47)

	Wärmestrahlung bei $\vartheta = 20$ °C	Sonnenstrahlung
	Emissionsgrad $\varepsilon (= \alpha)$	Absorptionsgrad α
Sichtbackstein rot	0,93	0,54
Dachziegel dunkelbraun	0,94	0,76
Kalksandstein	0,96	0,60
Beton glatt	0,96	0,55
Kunststoff-Verputz weiß	0,97	0,36
Mineralischer Verputz grau	0,97	0,65
Aluminium, anodisiert oder eloxiert	0,90	0,20 bis 0,40
Poliertes Aluminium	0,02 bis 0,04	0,10 bis 0,40
Fensterglas	0,90	0,04 bis 0,40 (je nach Durchlässigkeit)

Tab. 17: Absorptionsgrad von Polymeren (43)

Material	Absorptionsgrad ¹⁾
Butylkautschuk	0,92
Naturkautschuk	0,88
Polypropylen	0,87
Celluloseacetobutyrat (Folie)	0,84

1) für eine Schwarzkörperstrahlung von 1000 K, aus Spektralabsorptionskurven berechnete gerundete Durchschnittswerte

Tab. 18: Absorptionsgrad von Polymeren in Abhängigkeit von der Art und Temperatur der Strahlungsquelle (43)

Material	Absorptionsgrad ¹⁾			Flammenstrahlung ²⁾	Strahlung eines Kohlelichtbogens	Solarstrahlung
	bei 1000 K	bei 1500 K	bei 2500 K			
Silikonkautschuk	0,79	0,66	0,54	0,79	0,55	0,62
Polyethylen	0,92	0,88	0,77	0,93	0,64	0,57
Polystyren (klar)	0,75	0,60	0,35	0,78	0,18	0,095
Polystyren (weiß)	0,86	0,75	0,53	0,88	0,36	0,29
Polyvinylchlorid (klar)	0,81	0,65	0,38	0,85	0,21	0,15
Polymethylmethacrylat (weiß)	0,91	0,86	0,70	0,92	0,62	0,42
Polymethylmethacrylat (schwarz)	0,94	0,94	0,95	0,94	0,95	0,96
Polymethylmethacrylat (klar)	0,85	0,69	0,41	0,89	0,20	0,097
Polyamid 66	0,93	0,90	0,82	0,93	0,68	0,62
Phenolformaldehydharz	0,90	0,86	0,77	0,81	0,75	0,78

1) aus Spektralabsorptionskurven berechnete gerundete Mittelwerte

2) Strahlung einer Benzolflamme

Tab. 19: Zündgrenzen, Flamm- und Zündpunkte brennbarer Gase und Flüssigkeiten (4, 15, 19, 34, 35, 36, 39)

Stoff	Zündgrenzen ¹⁾ in Vol.-%		Flamm- punkt ²⁾ in °C	Zündtem- peratur ³⁾ in °C
	untere	obere		
1,2-Dichlorbenzen	2,2	12,0	66	640
1,2-Dichlorpropan	3,4	14,5	15	555
1,4-Dioxan	1,9	22,5	11	375
1-Nitropropan	3,4	-	49	420
Acrylnitril	2,8	28** stabilisiert	-5	480
Ameisensäure	10,0	45,5	42	520
Ammoniak	15,0	28,0	-	630
Anilin	1,2	11	76	630
Benzen	1,1	9,5	-11	540
Bromethan	6,7	11,3	-	510
Brommethan	8,6	20	-	535
n-Butan	1,5	8,5	- 60	365
Butanol-1	1,4	11,3	29	340
Butanon (Methylethylketon)	1,8	11,5	-6	515
Buttersäure	2,0	10	72	440
Chlorbenzen	1,3	11,0	28	590
Chlormethan	7,1	19,7	-24	625
Cyanwasserstoff	5,4	46,6	-18	535
Cyclohexan	1,0	9,3	-18	260
Cyclohexanon	1,5	8,9	44	420
Decan	0,6	5,5	46	205
Dichlorbenzol	2,2	12	66	640
Diethylamin	<-18	1,8	10,1	312
Diethylether	1,7	49	-45	170
Dimethylether	2	27	-42	240
Dioxan	1,9	22	11	375
Ethan	3,0	15,5	-	515
Ethanal	4,0	57,0	-38	204
Ethandiol	3,2	-	111	380
Ethanol	3,1	20	12	365
Ethansäure	3,3	22	40	454
Ethansäurebutylester	1,2	7,5	22	370
Ethansäuremethylester	3,1	16,0	-15	455
Ethen	2,7	34,0	-	425
Ethin	1,5	82	-	305
Furan	2,3	14,3	< -20	390
Heptan	1,1	6,7	- 4	220
n-Hexan	1,2	7,4	- 3,9	230
Hexanol-1	1,2	5,4	62	290

Fortsetzung Tab. 19: Zündgrenzen, Flamm- und Zündpunkte brennbarer Gase und Flüssigkeiten (4, 15, 19, 34, 35, 36, 39)

Stoff	Zündgrenzen ¹⁾ in Vol.-%		Flamm- punkt ²⁾ in °C	Zünd-tem- peratur ³⁾ in °C
	untere	obere		
Hydrazin	4,7	100 Zersetzung	52	270
Kohlenmonoxid	12,5	75,0	-	605
Methan	4,9	15,4	-	537
Methanal	7,0	73	-	420
Methanol	5,5	44	11	455
Methylamin	5,0	20,7	-18	430
Methylbutan	1,3	7,6	< -20	230
m-Xylen	1,1	7,0	25	525
Naphtalin	0,9	5,9	80	540
Nitrobenzen	1,8	-	77	445
Nitroethan	3,4	-	28	414
Nitromethan	7,1	63,0	33	415
Nonan	0,7	5,6	31	205
n-Octan	0,8	6,5	12	210
o-Xylen	1,0	7,6	30	465
n-Pentan	1,4	7,8	< -20	260
Petrolether (Ligroin)	1,1	5,9	< -18	288
Phenol	1,3	9,5	82	595
n-Propan	2,1	9,5	-	450
Propanol	2,3	21	< -20	190
Propanon	2,1	13,0	-18	465
Propantriol	2,6	11,3	160	362
Propen	2,4	11		458
Propylamin	2,0	10,4	-37	318
p-Xylen	1,1	7,0	27	540
Pyridin	1,7	10,6	17	550
Schwefelkohlenstoff	1,0	60,0	-30	90
Schwefelwasserstoff	4,3	45,5	-	270
Styrol	1,1	8	32	490
Thiophen	1,5	12,5	-9	395
Toluol	1,2	7,1	4	480
Wasserstoff	4,0	80,0	-	560

1) in Luft bei 20 °C und 1013 mbar

2) im geschlossenen Tiegel bei 1013 mbar

3) für das zündwilligste Brennstoff-Luft-Gemisch bei Kontakt mit einer heißen Oberfläche

Tab. 20: Beispiele für die Einteilung von Gasen und Dämpfen in Temperaturklassen entsprechend ihrer Zündtemperatur (1, 21)

Temperaturklasse	Zündtemperaturbereich in °C	Grenztemperatur in °C	Stoffbeispiel
T1	>450	>450	I*: Methan II** A: Aceton, Ammoniak, Methan, Methanol, Propan, Toluol, Essigsäure II B: Stadtgas II C: Wasserstoff
T2	>300 bis 450	>300 bis 450	II A: Ethylalkohol, n-Butan II B: Ethylen II C: Acetylen
T3	>200 bis 300	>200 bis 300	II A: Ottokraftstoffe, Dieselmotorkraftstoffe, Heizöle II B: Schwefelwasserstoff
T4	>135 bis 200	>135 bis 200	II A: Acetaldehyd, Diethylether
T5	>100 bis 135	>100 bis 135	
T6	> 85 bis 100	> 85 bis 100	II C: Schwefelkohlenstoff, Ethylnitrit

Gruppe I*: Elektrische Betriebsmittel für schlagwettergefährdete Grubenbaue.

Gruppe II**: Elektrische Betriebsmittel für alle übrigen explosionsgefährdeten Bereiche.

Tab. 21: Sicherheitstechnische Kennzahlen Explosionsschutz für Gase und Dämpfe (1, 9, 10, 19, 17, 27, 37)

Substanz	Explosionsgruppe nach DIN EN 50014	Übertragene Ladung Q in nC	Mindestzündenergie in mJ	zündwilligstes Gemisch in Vol.-%	Temperaturklasse	Grenzspaltweite in mm
Acetaldehyd	IIA		0,38		T4	0,92
Aceton	IIA	127	0,55	6,5	T1	1,04
Acrylnitril	IIB		0,16	9,0		0,87
Ammoniak	IIA	1500	14	20	T1	3,18
Benzol	IIA	45	0,20	4,7	T1	1,8
Benzine, Ottokraftstoffe Siedebeginn < 135	IIA				T3	-
1,3-Butadien	IIB		0,13	5,2		0,79
Butan	IIA	60	0,25	4,7	T2	0,98
Buten-1						0,94
2-Butanon	IIA		0,27	5,3	T1	0,85
n-Butanol	IIA				T2	0,87
Cyclohexan	IIA		0,22	3,8		0,94
Cyclohexanon	IIA				T2	0,95
Cyclopropan	IIB		0,17	6,3		0,91
n-Decan	IIA				T4	1,01
1,2-Dichlorethan	IIA		1,0	10,5	T2	1,8
Dieselmotorkraftstoffe (DIN 51601)	IIA				T3	
Düsenmotorkraftstoffe	II A				T3	
Dichlormethan	IIA	880 000	9300	18		
Diethylether	IIB	40	0,19	5,1		0,87
2,2-Dimethylbutan	IIA	70	0,25	3,4		
Essigsäure	IIA				T1	1,69
Essigsäureanhydrid	IIA				T2	1,17
Ethylacetat	IIA	120	0,46	5,2	T1	0,99
Ethan	IIA	70	0,25	6,5	T1	1,8
Ethen	IIB	32	0,082	8,0	T2	1,2
Ethin	IIC		0,019	7,7	T2	0,37
Ethanol	A II /II B	60	0,28	6,4	T2	0,89
Ethylenoxid	IIB		0,061	10,8	T2	0,59
Heizöl EL (DIN 51603)	IIA				T3	
Heizöl L (DIN 51603)	IIA				T3	
Heizöle M und S (DIN 51603)	IIA				T3	
n-Heptan	IIA	60	0,24	3,4		1,8
n-Hexan	IIA	60	0,24	3,8	T3	1,8
iso-Amylacetat	IIA				T2	
Kohlenmonoxid	IIA/II B				T1	0,94
Methan	IIA	70	0,28	8,5	T1	2,0
Methanol	IIA		0,14	14,7	T1	1,5
2-Methylbutan	IIA	63	0,21	3,8		0,98
Methylchlorid	IIA				T1	
Methylcyclohexan	IIA	70	0,27	3,5		
Naphthalin	IIA				T1	
n-Nonan						
n-Octan	IIA				T3	0,94
Ölsäure					T2	
n-Pentan						0,93
Pentanon (Diethylketon)	IIA	63	0,28	3,3		0,88

Fortsetzung Tab. 21: Sicherheitstechnische Kennzahlen Explosionsschutz für Gase und Dämpfe (1, 9, 10, 19, 17, 27, 37)

Substanz	Explo- sionsgrup- pe nach DIN EN 50014	Übertra- gene Ladung Q in nC	Mindest- zündener- gie in mJ	zündwillig- stes Gemisch in Vol.- %	Tempera- turklasse	Grenzspalt- weite in mm
cis-2-Penten	IIB	-	0,18	4,4		
trans-2-Penten	IIB	-	0,18	4,4		
Phenol	II A				T1	
Propan	IIA	70	0,25	5,2	T1	1,8
n-Propanol	IIB				T2	0,87
Propen	IIA				T1	0,91
1-Propin	IIB	-	0,11	6,5	T2	0,74
Propylenoxid	IIB	-	0,13	7,5	T2	0,7
Schwefelkohlenstoff	IIC	-	0,009	7,8	T6	
Schwefelwasserstoff	II B				T3	0,83
Spezialbenzine Siedebeginn < 135 °C	II A				T3	
Tetrafluoroethen	IIA	-	4,1		T3	2,2
Tetrahydro-2H-pyran	IIA	60	0,22	4,7		
Tetralin (Tetrahydronaphtalin)					T2	
Toluol					T1	1,06
1,1,1-Trichlorethan	IIA	700000	4800	12		
Trichlorethen	IIA	150000	510	26		
Wasserstoff	IIC	12	0,016	22	T1	0,5

Tab. 22: Zündgrenzen brennbarer Gase und Dämpfe in Luft bzw. Sauerstoff (4, 6, 15, 17, 19, 34, 35, 39)

Brennbarer Stoff	Zündgrenzen in Vol % in Luft		Zündgrenzen in Vol % in Sauerstoff	
	Untere	Obere	Untere	Obere
Acetophenon	0,8	–	-	-
Ammoniak	15,4	33	-	-
Butan	1,8	8,5	1,8	45
Buten	1,6	10,6	1,8	57,5
Dimethylether	2,7	18,6	3,9	61,0
Ethan	2,5	15,0	2,5	55
Ethanal	4,0	57	4,0	60
Ethanol	3,1	19	4,0	93,0
Ethylbenzol	0,5	7,8	-	-
Ethylen	2,8	33,5	3,0	81,5
Kohlenmonoxid	12,5	74	-	-
Methan	4,8	16,0	4,8	60,0
Methanol	6,3	33,0	-	-
Pentan	1,5	7,8	-	-
Propan	2,1	10,0	2,0	60,0
Propylen	2,3	12,0	2,3	54,5
Schwefelkohlenstoff	1,0	60,0	-	-
Schwefelwasserstoff	4,3	43,5	-	-
Toluol	1,2	7,0	-	-
Wasserstoff	4,0	76,0	4,0	95,0

Tab. 23: Eigenschaften ausgewählter brennbarer (technischer) Flüssigkeiten (15, 35, 48)

gefährliche brennbare Flüssigkeit	Flamm- punkt in °C	Zündgrenzen in Vol %		Dampf- dichte Luft = 1	Zündtem- peratur in °C
		Untere	Obere		
Waschbenzin, Testbenzin	-28	1,5	7,4		335
Farbverdünner	ca. 40	-0,8	ca. 6		ca. 210
Gasolin (100 Octan)	-36	1,4	7,6	ähnlich Testbenzin	456
Gemisch von Terpentin mit Pinen	35	0,8	Nicht bekannt		253
Lackverdünner (siehe Toluol)					
Asphalt	205				ca. 400
Dieselmotorenöl	67				255
Teer	90				600
Biodiesel (pr ISO 3679)	186				285
Schmieröl	125				500

Tab. 24: Mit Wasser vollständig mischbare brennbare Flüssigkeiten – Auswahl

Alkanole	Methanol, Ethanol, Propanol, tertiäres Butanol
Alkanale	Methanal, Ethanal
Alkanone	Propanon
Karbonsäuren	Methansäure, Ethansäure, Propionsäure, Acrylsäure
Polyole	Ethandiol, Propantriol
Stickstoffverbindungen	Pyridin, Acetonitril, Formamid, Propylamin
Sonstige Stoffe	Tetrahydrofuran, Dioxan, Ethylenglycolmonomethylester

Tab. 25: Verdunstungszahlen brennbarer Flüssigkeiten (2, 11, 35, 49, 53)

Stoff	Verdunstungszahl Diethylether = 1	Stoff	Verdunstungszahl Diethylether = 1
1,1,1-Trichlorethan	2,4	Isobutylacetat	5,8
1,2-Dichlorethan	1,8 bis 4,0	iso-Pentylacetat	13,0
1,4-Dioxan	7,3	iso-Propylacetat	4,2
1-Methoxy-2-propanol	22	Leuchtöl	40,0 bis 60,0
2-Butanon	6,0	Isophoron	330
2-Ethylhexanol	~600	Schwefelkohlenstoff	1,8
3-Methylbutanol-2	62	Trichlorethan	3,8
Aceton	2,1	Leichtbenzin	3,5
Amylacetat	15	Mesityloxid	8,2
Benzol	3,0	Methanol	6,3
Benzylalkohol	~1800	Methoxypropylacetat	34
Butandiol-1,4	43	Methylacetat	2,1
Butanol	33	Methylglykol	34
Butylacetat	12,0	Methylglycolacetat	21
Butyldiglykol	3750	Methylisobutylcarbinol	66
Butyldiglykolacetat	>3000	Methylcyclohexanol	800
Butylglykol	119	n-Hexan	1,4
Butylglykolacetat	137	Methyl-tert-butylether	1,6
Butyrolactat	>1000	n-Heptan	3,0
Chlorbenzol	12,5	Nitroethan	21
Chloroform	2,5	2-Nitropropan	10
Cyclohexanol	150	n-Nonan	17,0
Cyclohexanon	40,0	n-Octan	7,6
Cylohexan	3,4	Normalbenzin	8,0
Dekalin	94,0 bis 95	n-Pentan	<1
Dichlorbenzol	57,0	n-Pentanol	62 bis 65
Dichlormethan	1,8	n-Propylacetat	6,1
Diethylenglykol	1200	Perchloroethylen	6,0
Diisopropylether	1,6	Propanol-1	11,1
Dimethylacetamid	172	Propanol-2	10,5 bis 13,5 11
Dimethylether	1	Propylglykol	75
Dimethylformamid	120	Propylacetat	4,8
Dimethylsulfoxid	~700	Pyridin	36
Essigsäure	11,0 bis 24	Schwefelkohlenstoff	1,8
		Styrol	16
Ethanol	8,3	Terpentinöl	38
Ethoxypropanol	33	Testbenzin	40,0 bis 76
Ethoxypropylacetat	70	Tetrachlorethylen	11
Ethylacetat	2,9	Tetrachlormethan	4
Ethylbenzol	8,8	Tetrahydrofuran	2,2
Diethylenglykol	1200	Tetralin	190
Ethyldiglykolacetat	>1200	Trichlorethan	2,3
Ethylglykol	43	Trichlormethan	2,5
Ethylglykolacetat	57	Toluol	6,1
Furfuro	75	Trichloroethylen	3,1
Glykolmonoethyl-ether	34	Wasser	~80
Isoamylalkohol	62	Xylol	13,5
iso-Butanol	24,0		

Tab. 26: Zersetzungs-, Entflammungs- und Zündtemperaturen ausgewählter Kunststoffe (15, 22, 32, 39, 41, 54, 55)

Stoff	Zersetzungs- temperatur in °C	Entflammungs- temperatur in °C	Zündtemperatur in °C
ABS		390 bis 480	530
Butadien-Styren-Kautschuk		285	330
Cellulosediacetat		305	450 bis 540
Cellulosenitrat (Celluloid)		ca. 100	141
cis-1,4-Polyisopropen		290	340
Epoxid-Harz		>250	
Glasfaserverstärkter Polyester		335 bis 370	498
Harnstoff-Formaldehyd-Harz			470
Hartgummi		abhängig vom Füllstoff - eher schwer brennbar	
Melamin-Formaldehyd-Harz		475 bis 500	623 bis 645
Naturkautschuk		130	
Phenol-Formaldehyd-Harz ohne Füllstoff		335	545
Polyacrylnitril	250 bis 300	240	465 bis 560
Polyamid 6	300 bis 350	395 bis 399	415 bis 488
Polyamid 66	320 bis 400	380	425
Polyamid 66 (30 % glasfaserverstärkt)	> 300		
Polybutadien	ca. 300		
Polycarbonat	350 bis 400	519	575
Polyethylen-HD	340 bis 440	340	350 bis 440
Polyethylen-LD	340 bis 440	306 bis 341	439 bis 417
Polyethylenterephthalat	285 bis 305	ca. 440	480 bis 520
Polyimid			schwer entflammbar
Polyisobutylen			
Polymethylmetacrylat	170 bis 300	260 bis 300	430 bis 476
Polyoxymethylen	220	350 bis 400	400
Polypropylen	330 bis 410	350 bis 370	390 bis 410
Polystyrol	300 bis 400	345 bis 360	484 bis 500
Polystyrolschaum		290 bis 346	350 bis 491
Polytetrafluorethylen	500 bis 550	Entzündlich und brennbar nach Zersetzung > 540	Entzündlich und brennbar nach Zersetzung > 540
Polytrifluorchlorethylen		nicht brennbar	nicht brennbar
Polyurethan (Spritzgussmasse)		310	415
Polyurethan-Hartschaum	220	310 bis 440	415 bis 480
Polyurethan-Weichschaum		310 bis 440	415 bis 480
Polyvinylchlorid-hart	200 bis 300	385 bis 530	455 bis 530
Polyvinylchlorid-weich		390	455
Polyvinylidenchlorid		siehe PVC-hart	siehe PVC-hart
Siliconharz		505	560
Siliconharz (ungefüllt)		äußerst schwer brennbar	

Tab. 27: Temperaturkennwerte der Zündbereitschaft von technischen Erzeugnissen und Naturstoffen (15, 19, 22, 25, 26, 29, 32, 39, 57)

Stoff	Selbsterwärmungstemperatur in °C	Entflammungstemperatur in °C	Glimmtemperatur in °C	Zündtemperatur in °C	Mindestzündenergie des schwebenden Staubes in mJ
Acetylcellulose (Acetatseide)				440	ca. 39
Aluminium					50 bis 120
Antimon					2000
Baumwollgewebe (Ballen)	120	210	205	407	25
Baumwollwatte				260	25
Braunkohle				250 bis 280	30
Buchenholz				280 bis 320	
Celluloid (ca. 11 Gew.-% Stickstoff)				141	
Celluloseacetat-Gewebe		320	290	445	
Dextrin				391	40 bis 60
Eichenholzkompakt	120	238	298	375	
Eichenholzspäne	100	229	229	342	
Ethylcellulose				295	ca. 10
Fichtenholz	120		305	397	
Fichtenholzspäne	100		220	347	
Heu	70		204	333	
Holz (Holzmehl fein)				280 bis 320	20 bis 60
Holzfasierplatte	> 80 (Abrieb)		225	310 bis 340	20
Holzkohle				350	20
Kakao					100 bis 120
Kiefernholz	> 80		295	399	
Kiefernholzspäne	> 80		230	306	
Kiefernholzspäne				270	
Kohlenstoff				700	
Koks				500 bis 650	
Kork					40 bis 100
Melamin-Formaldehyd-Harz		300	310	430	
Maisstärke					30 bis 60
Nitrocellulose (> 12,6 Gew.-% Stickstoff)				180	
Papier	100 (füllstoffarm)			250 bis 360	
Paraffin				310	
Paraformaldehyd					20

Fortsetzung Tab. 27: Temperaturkennwerte der Zündbereitschaft von technischen Erzeugnissen und Naturstoffen (15, 19, 22, 25, 26, 29, 32, 39, 57)

Stoff	Selbsterwärmungstemperatur in °C	Entflammungstemperatur in °C	Glimmtemperatur in °C	Zündtemperatur in °C	Mindestzündenergie des schwebenden Staubes in mJ
Phenoplast (mit Holzmehl)		235	240	460	
roter Phosphor					0,2
Phosphor, weiß	> 50 (wenn fein- verteilt und trocken)			60	
Polyacrylamid					30
Schwefel		190		240	
Steinkohle				330 bis 440	
Tabak	70		210	360	
Teer/Asphalt				200 bis 500	
Torf				230	
Weizenmehl					40 bis 60
Weizenstroh	> 80 (eher für Haferstroh zutreffend)		210	310	50
Wellpappe – siehe auch Papier		285		427	
Zeitungs-papier (Blatt)				240	60
Zellulose				320	40 bis 80
Zirkonium					10 bis 30
Zucker				300 bis 400	40

Tab. 28: Glimm- und Zündtemperaturen ausgewählter Stäube (46)

Art des Staubes	Mindestzündtemperatur einer Staubwolke nach IEC 61241-2-1	Mindestzündtemperatur einer Staubschicht (Glimmtemperatur) nach IEC 61241-2-1
Ausgewählte Naturprodukte		
Baumwolle	560	350
Cellulose	500	370
Getreide	420	290
Holzmehl	400	300
Kakao	580	460
Kork	470	300
Kraftfutter	520	295
Milchpulver (Voll-, sprühgetr.)	520	330
Papier	570	335
Stärke	380	530
Steinkohle	590	270
Tabak	450	300
Tee	510	300
Torf	500	320
Weizenmehl	410	470
Zucker	450	360
Ausgewählte chemisch-technische Produkte		
Kautschuk	460	220
Petrolkoks	690	280
Polyvinylacetat	500	340
Polyvinylchlorid	680	430
Ruß	620	385
Schichtpressstoff (Schleifstaub)	510	330
Schwefel	280	280
Ausgewählte Metalle		
Aluminium	530	280
Bronze	390	260
Eisen	310	300
Magnesium	610	410
Mangan	330	285
Zink	570	440

Tab. 29: Mindestzündenergien von Polystyrenstaub in Abhängigkeit von der Größe der Staubpartikel (15)

Bereich der Teilchengröße in μm	Spezifische Oberfläche in m^2/kg	Zündwilligste Konzentration in g/m^3	Mindestzündenergie in mJ
< 75	671	38	1,8
75 bis 120	487	57	2,4
120 bis 160	350	70	5,2
160 bis 200	292	90	81,7

Tab. 30: Zündtemperaturen von schwebenden und lagernden Stäuben – beachte hierbei die in der Literaturstelle angegebenen Methoden (39)

Zündtemperatur in °C			
Stoff	schwebender Staub	lagernder Staub	
		heiße Fläche	heißer Raum
Aluminium	650 bis 820		720 bis 760
Baumwolle	470 bis 480		270 bis 280
Braunkohle, Ø	360	210	135
Cellulose	410 bis 480	350 bis 375	260 bis 310
Celluloseacetat	400 bis 480		340 bis 430
Dextrin	400 bis 420		360 bis 400
Getreidemischstaub	ca.- 297	230	ca. 480
Graphit	> 900		ca. 578
Holzkohle	ca. 640	320	ca. 257
Holzmehl - fein	ca. 485	ca. 324	ca. 270
Holzmehl - grob	ca. 487	ca. 320	ca. 215
Holzmehl (fein)	400 bis 520	300 bis 340	250 bis 300
Holzmehl (grob)	410 bis 560	310 bis 330	215
Kakao	ca. 585		ca. 220
Kartoffelstärke	ca. 517	570	
Kork	ca. 473	300	ca. 240
Lignin	ca. 480		
Magermilchpulver	ca. 525	ca. 347	200
Maisstärke	ca. 455		ca. 220
Papier	ca. 440	300	270
Papierstaub	440	300 bis 370	270
Sojamehl	ca. 560	ca. 263	ca. 265
Steinkohle, Ø	ca. 620	ca. 260	ca. 180
Tabak	450	300	230
Weizenmehl	ca. 413		ca. 393
Zellstoff	ca. 530	ca. 470	
Zucker	ca. 393		460

Tab. 31: Gegenüberstellung von Flammpunkten im geschlossenen Tiegel (c.c.) in Luft mit Flammpunkten c.c. in reinem Sauerstoff (6)

Produkt	Flammpunkt in Luft in °C	Flammpunkt in O ₂ in °C
1-Methylpyrrolidon-2, techn.	92	39
Dimethylformamid, techn.	58	28

Tab. 32: Flammpunkte von festen Stoffen unterhalb der Schmelztemperatur (6)

Produkt	Schmelztemperatur in °C	Flammpunkt c.c. in °C
2,6-Diphenylphenol	100	71
Dimethylterephthalat	140	105
Neopentylglykol	125	118
4-Chlorzoesäure	243	139

Tab. 33: Flammpunkte und Zündtemperaturen von in Wasser gelösten brennbaren Flüssigkeiten (39)

Produkt	Schmelztemperatur in °C	Flammpunkt c.c. in °C
2,6-Diphenylphenol	100	71
Dimethylterephthalat	140	105
Neopentylglykol	125	118
4-Chlorenzoesäure	243	139

Tab. 34: Flammpunkt in geschlossenem Tiegel – c.c., in offenem Tiegel – o.c. sowie Brennpunkt (6, 15, 35, 49)

Stoff	Flammpunkt in °C .		Brennpunkt in °C
	c. c	o. c.	
Aminobenzen	76	-	81
Butylglykolacetat	88	98	98
Ethanol	13	6	6
Ethylglykol (Cellosolve)	43	62	62
Hexadecan	135	142	152
iso-Pentanol	41	-	57
Methanol	11	1	1
n-Butanol	29	36	36
n-Decan	46	52	61,5
n-Propanol	26	16,5	16,5
Polyethylenglykol 1500		258	280
Polyethylenglykol 600	244	280	320
p-Xylol	27	31	44
Schmieröl	148	-	190
Schwefelkohlenstoff	30	-	-29
Sonnenblumenöl	148	160	-
Toluen	6	14	18
Wärmeträgeröl (Marlotherm S)*	203	220	240
Wärmeträgeröl (Marlotherm L)*	130	146	158

* Produkt der Fa. Hüls

Tab. 35: Heizwerte und Abbrandgeschwindigkeiten brennbarer Stoffe (2, 5, 13, 16, 39, 40)

Stoff	Heizwert in MJ/kg	Abbrandgeschwindigkeit $V_{ab, Spez}$ in kg/m^2min	Stoff	Heizwert in MJ/kg	Abbrandgeschwindigkeit $V_{ab, Spez}$ in kg/m^2min
Brennstoffe und technische Erzeugnisse					
Acetatseide	18,50	1,13 ¹⁾	Natrium	9,0	0,80 ¹⁾
Anthrazit, Stückkohle	35,3 ²⁾		Rohbraunkohle, lufttrocken (Rheinland)	8,1 (9,96) ²⁾	
Baumwolle, Ballen	15,70	0,15 ¹⁾	Stärke	17, 6	
Baumwolle, locker	15,70	0,24 ¹⁾	Steinkohle	27 bis 32,4	
Baumwollstoff	17, 4	0,72 ¹⁾	technische Gummiprodukte	ca. 36,0	0,67 ¹⁾
Braunkohle	16 bis 20,1		Torf, trocken	21, 7	
Braunkohlenbrikett	20, 9		Weizenmehl	15, 4	
Brikett	19,26 (20,58) ²⁾		Weizenstroh, getrocknet	11,72 (13,11) ²⁾	
Celluloid, Film	18	70,00 ¹⁾	Wolle	23, 2	
Cellulose	16, 3		Zucker	17, 1	
D-Glucose	15,4		Natrium	9,0	0,80 ¹⁾
Gasflammkohle, Stückkohle (Ruhr)	29,680 (30,85) ²⁾		Rohbraunkohle, lufttrocken (Rheinland)	8,1 (9,96) ²⁾	
geschichtetes Papier	17,64	0,40 ¹⁾	Stärke	17, 6	
Getreidestaub	13, 6		Steinkohle	27 bis 32,4	
Heu	16, 7		technische Gummiprodukte	ca. 36,0	0,67 ¹⁾
Kalium	4,68	1,20 ¹⁾	Torf, trocken	21, 7	
Knüllpapier	15,12	0,48 ¹⁾	Weizenmehl	15, 4	
Müll (Mittelwert, deutsche Großstädte)	4,2		Weizenstroh, getrocknet	11,72 (13,11) ²⁾	

Fortsetzung Tab. 35: Heizwerte und Abbrandgeschwindigkeiten brennbarer Stoffe (2, 5, 13, 16, 39, 40)

Stoff	Heizwert in MJ/kg	Abbrandgeschwindigkeit $V_{ab, Spez}$ in $kg/m^2 \cdot min$	Stoff	Heizwert in MJ/kg	Abbrandgeschwindigkeit $V_{ab, Spez}$ in $kg/m^2 \cdot min$
Hölzer und Holzprodukte					
Ahorn	17,17		Holz, trocken	19,5	
Birke	18		Holzspäne	15,7	
Buche	16,74		Holzspanplatte	19,2	
Douglasie	18,42		Kiefer	18,42	
Eiche	17,58		Lärche	18,42	
Eiche (red oak)	11,1		Pappel	17,17	
Erle	17,17		Robinie	17,17	
Esche	17,17		Tanne	18,84	
Europäische Hölzer, frisch (Mittelwert)	8,4 (9,91) ²⁾		Tannenholz		0,78
Europäische Hölzer, lufttrocken (Mittelwert)	15,31 (16,86) ²⁾		Tropische Hölzer, lufttrocken (Mittelwert)	16,59 (17,97) ²⁾	
Fichte	18,84		Ulme	17,17	
Holz, frisch	8,2		Weide	17,17	
Ausgewählte organische Feststoffe					
Phenol	32,5		Bisphenol A		
Adipinsäure	21,00		Resorcin	26,47	
Anthracen	42,12		Brenzcatechin	23,64	
Camphen	46,00		Hydrochinon	24,80	
Harnstoff	9,36		Maleinsäureanhydrid	14,36	
Paraffin	47,00		Naphthalin	40,57	
Benzoesäure	26,47		Phthalsäureanhydrid	22,17	
Pikrinsäure			Terephthalsäure	19,45	
Stearinsäure	40,26		ϵ -Caprolactam		
Paraformaldehyd	15,70		Di-tert.-butylperoxid	8,66	

Fortsetzung Tab. 35: Heizwerte und Abbrandgeschwindigkeiten brennbarer Stoffe (2, 5, 13, 16, 39, 40)

Stoff	Heizwert in MJ/kg	Abbrandgeschwindigkeit $v_{ab, Spez}$ in $kg/m^2 \cdot min$	Stoff	Heizwert in MJ/kg	Abbrandgeschwindigkeit $v_{ab, Spez}$ in $kg/m^2 \cdot min$
Brennbare Flüssigkeiten und ausgewählte Flüssiggase					
Aceton	30,79	1,11; 2,46 ³⁾	Methan-fl.	49,3	4,68 ³⁾
Benzen	40,00	2,76; 5,10 ³⁾	Methanol	19,83	0,96; 1,02 ³⁾
Benzin	41 bis bis 44	2,88 ³⁾	n-Octan	44,77	
1-Butanol	33,66	0,87	n-Pentan	45,27	
Butanol-2	33,28	0,90	Pentanol-2		1,11
Cyclohexan	43,81		1-Pentanol	34,6	1,05
Diesekraftstoff/leichtes	40,5 bis 44,5	2,10 ³⁾	Pentanon-2	34,7	1,15
Dieseldöl	41,8 - 42,7		Petrolether s. a Gasolin		1,74
Diethylether	40,4	2,10; 5,10 ³⁾	Petroleum s. a. Kerosin		0,92
Erdöl	43,5 - 46,0		Propan-fl.	46,45	5,94 ³⁾
Ethanol/ Spiritus	26,78	0,90 ³⁾	Schwefelkohlenstoff	14,57	2,22
Gasolin	44,28	3,30 ³⁾	Super- Benzin	42,17	
Heizöl	40,2 - 44,8		Terpentinöl	37,70	2,06
Heptan	44,4	6,06 ³⁾	Toluol	40,7	2,31
Hexan	44,6	4,44 ³⁾	Wasserstoff-fl.	120,3	1,02 ³⁾
Kerosin	43,2	1,53; 2,34 ³⁾	Xylen	41,2	5,40 ³⁾

Fortsetzung Tab. 35: Heizwerte und Abbrandgeschwindigkeiten brennbarer Stoffe (2, 5, 13, 16, 39, 40)

Stoff	Heizwert in MJ/kg	Abbrandgeschwindigkeit V _{ab,Spez} in kg/m ² min	Stoff	Heizwert in MJ/kg	Abbrandgeschwindigkeit V _{ab,Spez} in kg/m ² min
Hochpolymere Stoffe (Kunststoffe)					
Nylon 6,6	29,58		Polyoxymethylen	15,46	0,96
Phenoplast-Hartschaum (flammwidrig)		0,66	Polypropylen	43,31	
Polyacrylnitril	30,80		Polystyren	39,85	
Polycarbonat	29,72		Polystyrenschaum	38,00	1,50
Polyester	22		Polyurethan- Weichschaum	29,5	1,92
Polyethylen	43,28-46,5		Polyvinylchlorid-hart	16,43	
Polyethyleneterephthalat	22,00	0,84	Polyvinylchlorid-weich	20,0	
Polyisocyanurat- Hartschaum (flammwidrig mit Glasfasern)		0,54	Polytetrafluorethylen	4,5	
Polymethylmethacrylat	24,89	1,44			
Gase, technische Gase					
Acetylen	48, 3		Kohlenmonoxid	10,10	
n-Butan	45,69		Methan	49,3	
Ethan	47, 7		Propan	46,45	
Ethen	50,35		Stadtgas	14, 2 - 14, 6	
Ethin	48,20		Wasserstoff	120, 3	
Flüssiggas (LPG)	46, 2				

1) Brände in Räumen 2) in Klammern o. Heizwert 3) große Brandflächen

Tab. 36: Flammentemperaturen einiger Brandstoffe bei ihrer Verbrennung in Luft (9, 10, 16, 19, 20, 24, 50)

Brandstoff	Flammentemperatur (°C)	
	adiabatisch	real
Acetylen	2.325	
Butan	1.895	
Holzkohle	2.200	1.390
Kohle (Anthrazit)	2.210	
Ethan	1.895	
Ethylalkohol	840	
Hexan	1.948	
Wasserstoff	2.130	
Gasolin	2.261	810
Methan	1.950	
Propan	1.925	
Holz	1.590	600 bis 1.000

Tab. 37: Maximale Flammenfortpflanzungsgeschwindigkeit V_{FFmax} in Gas- und Dampf-Luft-Gemischen (9, 10)

Stoff	V_{FF} in m/s	Stoff	V_{FF} in m/s	Stoff	V_{FF} in m/s
Methan	0,43	Ethan	0,49	Propan	0,47
n-Pentan	0,55	Ethen	0,78	Ethin	1,68
Methanol	0,43	Propanol-2	0,42	Propanon	0,43
Ethylacetat	0,37	Benzen	0,41	Schwefelkohlenstoff	0,59
Kohlenmonoxid	0,45	Ammoniak	0,23	Wasserstoff	2,80

Werte für Normaldruck und 20 °C sowie auf die fortpflanzungswilligste Gemischkonzentration bezogen

Tab. 38: Flammenfortpflanzungsgeschwindigkeit V_{FF} bei Wasserstoff-Luft-Gemischen (9, 10)

Vol.-% H_2	V_{FF} in m/s	Vol.-% H_2	V_{FF} in m/s	Vol.-% H_2	V_{FF} in m/s
16	0,3	24	0,95	32	1,75
46	2,67	56	1,80	64	1,15
72	0,85	80	0,65		

Tab. 39: Flammenfortpflanzungsgeschwindigkeit V_{FF} bei Ammoniak-Sauerstoff-Gemischen (9, 10)

Vol.-% NH_3	V_{FF} in m/s	Vol.-% NH_3	V_{FF} in m/s	Vol.-% NH_3	V_{FF} in m/s
40	1,2	45	1,37	50	1,50
55	1,52	60	1,14	70	0,48

Tab. 40: Einfluss der Temperatur auf die Flammenfortpflanzungsgeschwindigkeit V_{FF} bei Gas-Luft-Gemischen (9, 10)

Brennstoff	V_{FF} in m/s bei nachfolgenden Temperaturen		
	160 °C	320 °C	480 °C
Methan	0,25	0,38	0,80
Propan	0,35	0,42	0,85
Ethen	0,40	0,75	1,30

Tab. 41: Druckabhängigkeit der Flammenfortpflanzungsgeschwindigkeit V_{FF} bei Ethan in Luft und Sauerstoff (9, 10)

Gemisch	V_{FF} in m/s bei nachfolgenden Drücken				
	0,1 bar	0,5 bar	1 bar	2 bar	3 bar
Ethan-Luft	0,70	0,50	0,40	0,35	0,30
Ethan-Sauerstoff	4,50	4,60	4,70	4,80	4,90

Tab. 42: Brandausbreitungsgeschwindigkeit bei Gasen und Flüssigkeiten (2, 16)

Brennbares Gas	Brandausbreitungsgeschwindigkeit in m/min	
	stöch. Verhältnis – Konz. in Klammern (Vol.-%)	max. Geschwindigkeit – Konz. in Klammern (Vol.-%)
Wasserstoff	96,00 (29,5)	160 (42)
Methan	20,4 (29,5)	24,6 (10,5)
Acetylen	60 (7,7)	81,0 (10,0)
Ethylen	36 (6,5)	37,8 (7,0)
Brennbare Flüssigkeit	Brandausbreitungsgeschwindigkeit in m/min	
	bei 10 °C	bei 20 °C
Azeton	19,0	-
Ethylalkohol	7,8	22,8
Buthylalkohol	2,5	4,8
Diethylalkohol	22,5	-
Toluol	10,2	50,4

Tab. 43: Abbrandraten für Bauholz nach DIN 4102-4/A1 : 2004-11 und
DIN 4102-22 : 2004-11

Holzprodukt		Abbrandrate β_n in mm/min
Nadelholz	Vollholz mit einer charakt. Rohdichte $\geq 290 \text{ kg/m}^3$ und einer Mindeststababmessung von 35 mm	0,8
	Brettschichtholz mit einer charakt. Rohdichte $\geq 290 \text{ kg/m}^3$	0,7
Laubholz	Massives Vollholz mit einer charakt. Rohdichte zwischen 290 und 450 kg/m^3	0,7
	Massives Vollholz mit einer charakt. Rohdichte $\geq 450 \text{ kg/m}^3$	0,5
Buche	Nadelholz (Mindestdicke = 35 mm)	0,8
Furnierschichtplatten		0,7
Platten	Massivholzplatten	0,9
	Sperrholz	1,0
	Andere Holzwerkstoffplatten nach DIN EN 13986	0,9

Tab. 44: Spezifische Abbrandgeschwindigkeit $v_{ab,Spez}$ von Flüssigkeiten bei einem Behälterdurchmesser = 6,2 cm, d. h. bei laminaren Strömungsverhältnissen (16)

Stoff	$v_{ab,Spez}$ in $\text{kg/m}^2\text{min}$
Benzen	2,76
Butanol	0,87
Butanol-2	0,90
Diethylether	2,10
Kerosin	1,53
Methanol	0,96
Pentanol-2	1,11
Pentanol	1,05
Pentanon-2	1,15
Petrolether	1,74
Petroleum	0,92
Propanon	1,11
Schwefelkohlenstoff	2,22
Terpentinöl	2,06
Toluen	2,31

Tab. 45: Spezifische Abbrandgeschwindigkeiten $v_{ab, spez}$ bei großen Brandflächen (2, 5, 40)

Flüssigkeiten in Behältern			
Stoff	$v_{ab, spez}$ in kg/m^2min	Stoff	$v_{ab, spez}$ in kg/m^2min
Benzen	5,10	Kerosin	2,34
Benzin	2,88	Methan ¹⁾	4,68
Diethylether	5,10	Methanol	1,02
Ethanol	0,90	Propan ¹⁾	5,94
Gasolin	3,30	Propanon	2,46
Heizöl, leicht	2,10	Wasserstoff ¹⁾	1,02
Heptan	6,06	Xylen	5,40
Hexan	4,44		
Kunststoffe und Holz			
Polyurethan-Weichschaum	1,92	Phenoplast-Hartschaum (flammschützend)	0,66
Polyesterharz (ungesättigt mit Glasfasern)	1,08	Polymethylenmethacrylat	1,44
Tannenholz	0,78	Polyethylen	0,84
Polystyrenschaum	1,50	Polyisocyanurat-Hartschaum (flammschützend mit Glasfasern)	0,54
Polyoxymethylen	0,96		
Feststoffe in Räumen²⁾			
Baumwollstoff	0,72	technische Gummiprodukte	0,67
Baumwolle, locker	0,24	Celluloid, Film	70,00
Baumwolle, Ballen	0,15	Kalium	1,20
Acetatseide	1,13	Natrium	0,80
Knüllpapier	0,48	geschichtetes Papier	0,40

1) In Form des Flüssiggases

2) für nicht näher bezeichnete Stoffanordnungen in Räumen mit einem Öffnungsverhältnis n_{off} von 0,16 (n_{off} : Verhältnis der am Gasaustausch beteiligten Öffnungsflächen zur Grundfläche des Raumes)

Tab. 46: Brandverhaltenscharakteristik ausgewählter Kunststoffe (15, 28, 31)

Namen/Kurzzeichen	Brandverhalten	Flammenfarbe/Geruch	Werkstoffbeispiel
Acrylnitril-Butadien-Styrol-Polymerisat/ABS	Brennt mit leuchtender Flamme	rußt stark, riecht nach Stadtgas	Formteile, Gehäuse (KZ-Industrie, Elektroindustrie), Schutzhelme
Alkydharz	Gelb, rauchend (rußend)	Scharf, stechend	Lackrohstoff
Celluloseacetat/CA	Brennt mit gelber sprühender Flamme	Tropft, riecht nach Essigsäure und verbranntem Papier	Textilfasern, Folien, techn. Produkte
Celluloseacetobutyrat/CAB	Brennt mit gelber sprühender Flamme	tropft brennend, riecht nach ranziger Butter	
Harnstoff-Formaldehyd/JF	schwer entflammbar	verkohlt mit weißen Kanten, riecht nach Ammoniak	Elektroinstallationsmaterial, Verpackungsmaterial, Schichtpressstoffe
Melamin-Formaldehyd-Harz/MF	schwer entflammbar	verkohlt mit weißen Kanten, riecht nach Ammoniak	Formteile, Gehäuse, Platten, Beschichtungen
Phenol-Formaldehyd-Harz/PF	schwer entflammbar	gelbe Flamme, verkohlt, riecht nach Phenol und verbranntem Holz	Formteile, Gehäuse, Platten, Beschichtungen
Phenol-Formaldehyd-Harz/PF	schwer entflammbar	gelbe Flamme, verkohlt (Trennung der Schichten), riecht nach Phenol und verbranntem Zellstoff	Formteile, Gehäuse, Platten, Beschichtungen
Phenol-Formaldehyd-Harz/PF	schwer entflammbar	gelbe Flamme, verkohlt (Trennung der Schichten), riecht nach Phenol und verbranntem Zellstoff	Formteile, Gehäuse, Platten, Beschichtungen
Polyacrylnitril/PAN			techn. und Textilfasern, Fasern u. a. auch Weiterarbeitung zu Kohlefasern
Polyamide/PA	verbrennen mit blauer Flamme, die bräunlich-gelb geräuchert ist. Es schäumt blasig und fadenziehend bis zur Verkohlung auf.	Es tropft fadenziehend ab. Ein Geruch nach verbranntem Horn ist festzustellen	Faserherstellung für Bekleidung, Teppichen und Bodenbelägen, Tafe, Borsten und technische Fasern, Herstellung von Folien, von Haushaltsgeräten, elektrotechnischen Artikeln, Heizöltanks, in der Bau- und Möbelindustrie.

Fortsetzung Tab. 46: Brandverhaltenscharakteristik ausgewählter Kunststoffe (15, 28, 31)

Namen/Kurzzeichen Polycarbonat/PC	Brandverhalten	Flammenfarbe/Geruch	Werkstoffbeispiele
Polyethylen/PE	In kleinen Mengen brennt PC kaum. Bei größeren Mengen und ausreichender externer Wärmezufuhr brennt PC mit sprühender, dunkelgelber Flamme unter starker Rußbildung, Produkt treibt blasig auf. Brennt mit blau durchscheinender, heller Flamme und mäßig starker Rauchbildung	tropft brennend ab, u.U. können sich auch große Rußflocken bilden. Geruch ist meist paraffinartig	Elektronikindustrie für Bauteilgehäuse, Gehäuse, Schalter, in der Lichttechnik, in der Haushaltstechnik, im Fahrzeugbau und im Bausektor
Polymethylmethacrylat/PMMA	Gelb, nur sehr gering rauchend	Süßlich, aromatisch	Folien, Verpackungsmaterial, Platten, Rohre, Formteile, Haushaltsgeräte
Polyoxymethylen/POM	Polyoxymethylen verbrennt mit bläulicher Flamme und kann abtropfen.	Hinterlässt einen stechenden Geruch.	Zahntechnik, Optik, Fahrzeugindustrie (Beleuchtungstechnik), bruchstichere Verglasungen, Sanitärinstallation, Elektroindustrie u. a.
Polypropylen/PP	Brennt mit blaudurchscheinender, heller Flamme und mäßig starker Rauchbildung.	Tropft brennend ab, u.U. können sich auch große Rußflocken bilden. Geruch ist meist paraffinartig	Maschinenbau, Fahrzeugbau, Elektrotechnik, Möbelindustrie, Haushaltsgeräte, Sportindustrie technische Teile, Haushaltsgeräte, Folien, Beschichtungen, Rohre, Teppichbeschichtungen und Baugewerbe
Polytetrafluorethylen/PTFE	Polytetrafluorethylen ist nicht brennbar.		Maschinenbau, Bauwesen, Elektrotechnik, Beschichtungen, Haushaltsgeräte
Polyurethan/PUR	Brennt mit gelber Flamme, PUR-hart brennt allein sehr schlecht	stark stechender Geruch, leicht sauer	Bau-, Möbel-, Schuh-, Fahrzeug-, Lack-, Elektro- und Textilindustrie, sowie im Maschinenbau, in der Kältetechnik, in der Wärmedämmung und im Verpackungssektor

Fortsetzung Tab. 46: Brandverhaltenscharakteristik ausgewählter Kunststoffe (15, 28, 31)

Namen/Kurzzeichen	Brandverhalten	Flammenfarbe/Geruch	Werkstoffbeispiel
Polyvinylchlorid-weich/PVC-weich	Brennbarkeit ist abhängig von Art und Menge an Weichmacher. Brennt mit stark rußender Flamme unter Zersetzung	Zersetzungerscheinungen verbunden mit Geruch nach Salzsäure.	Fußbodenbeläge, Folien, Kunstleder, Schläuche und Kabel
Polyvinylidenchlorid/PVDC	Praktisch nichtbrennbar bedingt durch hohen Chlorgehalt. Verkohlt im Brandfall.	Zersetzungerscheinungen verbunden mit Geruch nach Salzsäure.	Verbundfolien, Textilfasern
Silikonkautschuk	Helles Weiß-gelb	Geringer Rauch, weißliche Nebel	Spezielle Schlauch-, Dichtungs- und Baumaterialien
Styrol-Acrylnitril-Copolymer/SAN	Brennt mit leuchtender Flamme	rußt stark, riecht nach Stadtgas, tropft brennend ab	Hochwertige Formteile, Gehäuse, Verpackungen, Sanitärarmaturen u. a.
Styrol-Butadien-Copolymer/SB	Brennt mit leuchtender Flamme	rußt stark, riecht nach Stadtgas und Gummi, tropft	Formteile, Gehäuse u. a.
Synthesekautschuk siehe auch SAN, ABS und SB	Die meisten Kautschuke verbrennen unter starker Rauchentwicklung	unterschiedlich riechen	Ausgangsprodukte für die Herstellung von Reifen und Reifenprodukten, Schläuchen, Spezialbodenbelägen, Keilriemen, Dichtungen, Apparatebau u. a.
Ungesättigtes Polyesterharz/UP	Brennt mit leuchtender Flamme	verkohlt, rußt, riecht nach Styrol, Glasfaserrückstand	Formmassen, Hohlkörper, Folien und Fasern.

Tab. 47: Wärmefreisetzungsraten üblicher Brände (15)

Brandart	Wärmeleistung (Wärmestrom) in W
Glimmende Zigarette	5
Zündholz	50
normaler Papierkorb mit Papier	150×10^3
Polsterstuhl	$150 \text{ bis } 250 \times 10^3$
Moderner Sessel	$350 \text{ bis } 750 \times 10^3$
Lehnstuhl (synthetische Polsterung und synthetischer Bezugsstoff)	$500 \text{ bis } 1000 \times 10^3$
Couch (synthetische Polsterung und synthetischer Bezugsstoff)	$1 \text{ bis } 3 \times 10^6$
Gasolinlache (2,28 l auf einer Betonfläche)	1×10^6
Weihnachtsbaum	$1 \text{ bis } 2 \times 10^6$
Wohn- bzw. Schlafzimmer	bis $10 \times 10^{6*}$

* in Abhängigkeit von der Raumöffnungsfläche

Literatur (Tabellen)

1

ATEX-Produktrichtlinie 94/9/EG

2

Autorenkollektiv: Brandschutz – Formeln und Tabellen; Staatsverlag der DDR, Berlin 1979

3

Autorenkollektiv: Chemisch-technische Stoffwerte – eine Datensammlung, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig 1984

4

Autorenkollektiv: Tabellenbuch Chemie, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig 1968

5

Babrauskas, V.: Burning Rates in The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, National Fire Protection Association, Quincy MA , 1990

6

Bartknecht, W.: Explosionsschutz-Grundlagen und Anwendung, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, London, Paris, Tokyo, Hong Kong, Barcelona, Budapest, 1993

7

Behr, E.: Hochtemperaturbeständige Kunststoffe; C. Hanser Verlag, München 1969

8

Bühler, K.-U.: Spezialplaste; Akademie-Verlag, Berlin 1978

9

Bussenius, S.: Brand- und Explosionsschutz in der Industrie, Staatsverlag der DDR, Berlin, 1989

10

Bussenius, S.: Wissenschaftliche Grundlagen des Brand- und Explosionsschutzes, Kohlhammer, Stuttgart, Berlin, Köln, 1996

11

CD Römpp Chemie Lexikon – Version 1.0, Stuttgart/New York: Georg Thieme Verlag 1995

12

Cowie, J. M. G.: Chemie und Physik der synthetischen Polymeren, Vieweg-Verlag, Braunschweig/Wiesbaden 1997

13

D'Ans, J. und Lax, E.: Taschenbuch für Physiker und Chemiker 4. Auflage, Springer Verlag, Berlin u. a. 1998

14

DeHaan, J. D.: Kirk's Fire Investigation, 7th ed. Pearson/Prentice Hall, 2007

15

Demidov, P. G. und Sauschew, W. S.: Verbrennung und Eigenschaften brennbarer Stoffe, Staatsverlag der DDR Berlin, 1980

16

Drysdale, D.: An Introduction to Fire Dynamics, 2 edit., John Wiley and Sons, New York, 1999

17

Fire Protection Guide on Hazardous Materials (12th ed.). National Fire Protection Association – NFPA, Quincy, MA, 1997

18

Forschungszentrum Jülich Bericht 220-1902.00 10/98,

19

Freytag, H. H.: Handbuch der Raumexplosionen, Verlag Chemie, Weinheim 1965,

20

Gaydon, A. G.: The Spectroscopy of Flames, Chapman and Hall, London (1974)

21

Hähnel, E.: Lexikon Brandschutz, Staatsverlag der DDR, Berlin 1984

22

Hamberger, W.: Sicherheitstechnische Kennwerte; Brandschutz 45 (1991) 1

23

Hauser, G.: Bauphysikalische Grundlagen – Wärmelehre, Vorlesungsskript Bauphysik I

24

Hennig, F. und H. Moser: Temperaturmessung, Springer-Verlag, Berlin, 1977

25

<http://bgia-online.hvbg.de/STAUBEX/explosuche.aspx>

26

http://files.pepperl-fuchs.com/selector_files/navi/productInfo/doct/tdoct0745b_ger.pdf

27

<http://mitglied.lycos.de/peterlutz/kunststoffe/mkun6a.html>

28

<http://mitglied.multimania.de/Autoelektrik/Ere.htm>

29

http://publikationen.dguv.de/dguv/pdf/10002/bia-report_12-97.pdf

30

<http://www.dguv.de/ifa/de/gestis/stoffdb/index.jsp>

31

<http://www.dtic.mil/cgi-bin/GetTRDoc?Location=U2&doc=GetTRDoc.pdf&AD=ADA306592>

32

http://www.sierragal.com/252_stuff/Physical_constants_for_fire_investigators.pdf

33

Kretschmer, W.: Ingenieur-Taschenbuch; VEB Verlag Technik, Berlin 1959

34

Nabert, K. und Schön, G.: Sicherheitstechnische Kennzahlen brennbarer Gase und Dämpfe, Deutscher Eichverlag, Berlin 1963

35

Reinhardt, H. und Kirchhof, E.: Brennbare Flüssigkeiten; Staatsverlag der DDR, Berlin 1973

36

Reuter, H.: Formeln und Tabellen für die Feuerwehr, 5. Auflage; Verlag W. Kohlhammer, Stuttgart 1987

37

Saechtling-Zebrowski, Kunststoff-Taschenbuch, Carl-Hanser-Verlag München 1971

38

Schaaf, W. und Hahnemann, A.: Verarbeitung von Plasten; VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig 1970

39

Steinleitner, H. D. u. a.: Brandschutz und sicherheitstechnische Kennwerte gefährlicher Stoffe, Staatsverlag der DDR, Berlin 1988

40

Tewarson, A. and Pion, R. F.: Burning intensity of commercial samples of plastics, Fire Technology, Volume 11, Number 4, 1975

41

VdS-Richtlinie 2516 : 2000-12 (01) Kunststoffe, Eigenschaften, Brandverhalten, Brand-
gefahren bzw. http://vds.de/fileadmin/vds_publikationen/vds_2516_web.pdf

42

Wagner, W.: Wärmeübertragung; Vogel Buchverlag, Würzburg 1989

43

Welker, J. R.: Ignition of combustible solids; Report 73069, University of Oklahoma, 1973

44

wiki.epfl.ch/fournisseursdocuments/werkstoffgruppen.xls

45

www.ahlborn-kunststoffe.at/

46

www.bartec.de/homepage/deu/downloads/produkte/exschutz/ExSchutz.pdf

47

www.bp.bv.tum.de/de/lehre/Skript_Waerme_06_2006.pdf

48

www.btf-dynea.at/links_skripten/Skriptum%20Brennbare%20Stoffe%20V1.0.pdf

49

www.draeger.com/at/ST/ueberST/DHeft/PDF/DH366-PDF/51_55.pdf

50

www.farago.info/job/Verbrennungen/DritteBrenner.htm

51

www.goodfellow.com/de/

52

www.gsbl.de

53

www.hvbg.de/d/bia/pub/rep/rep01/biar0301/kap3.pdf

54

www.lfu.bayern.de/luft/doc/kunststoffbraende.pdf

55

www.mhaeberl.de/KUT/13ThermischV.htm

56

www.roempp.com/prod/

57


www.stahl.de/fileadmin/Dateien/download.../staubEX_d.pdf

58

www.westfalen-ag.de

59

www.zellbiophysik.fh-aachen.de/zat/220w.pdf



Brände verursachen nicht nur immense Sachschäden, sondern stellen für Menschen oftmals eine tödliche Gefahr dar. Die Ursache eines Brandes muss daher durch Sachbeweis eindeutig festgestellt werden, denn nur durch die vollständige Aufklärung der Brandursache werden die strafrechtlichen Interessen des Staates bzw. die Ansprüche der Geschädigten auf Schadenersatz gewahrt.

Erst nach Aufklärung der Brandursache kann entschieden werden, ob eine fahrlässige Brandstiftung, eine vorsätzliche Brandstiftung oder ein technisches Versagen vorliegen. Die Feststellung einer Brandursache erfordert einen großen Zeitaufwand, hohen Einsatz an technischem Gerät sowie auch finanzielle Aufwendungen. Die Arbeiten an den unterschiedlichsten Einsatzorten gehen mit einer latenten und vielfältigen Gefährdung der Brandermittler einher. In dem methodischen Leitfaden werden die Grundlagen des planmäßigen und folgerichtigen Vorgehens am Brandort beschrieben.

Der Leitfaden ist als Nachschlagewerk, als Ratgeber und Handbuch konzipiert. Als Zielgruppe des Leitfadens werden die Ermittlungsbehörden (Polizei, Staatsanwaltschaften), die Straf- und Zivilgerichte, Sachverständige von Behörden und der Versicherungswirtschaft sowie die Angehörigen der gesamten Rechtspflege gesehen. Folgende Hauptpunkte werden behandelt:

- Zündung und Verbrennung, brennbare Stoffe, Verbrennungsprozesse, Zündbereitschaft, Brennbarkeit und Brandverhalten – Kenngrößen, Branddynamik in Räumen
- Maßnahmen am Brandort, Sofortmaßnahmen, Erfassung der örtlichen, zeitlichen und personellen Zusammenhänge, Dokumentation der Spuren, Erfassung technischer Prozesse und sicherheitstechnischer Aspekte, Eigensicherung, Arbeitsschutz
- Ermittlung von Brandursachen, Methodik (Eliminationsverfahren, direkter Beweis), sachkundige Feststellung der Brandursache
- Brandursachen, Zündung durch natürliche, chemische und physikalische Prozesse, Selbsterhitzung, Selbstentzündung, Brandstiftungen, bauliche Mängel, Explosionen
- analytische Untersuchungsmethoden (chromatographische Verfahren, spektroskopische und thermoanalytische Methoden, Infrarotthermographie).
- experimentelle Beweisführung, Planung von Brandversuchen, Rekonstruktion und Modellierung von Prozessen
- Erstellung eines Sachverständigengutachtens
- Stellung des Sachverständigen und seine Pflichten, Qualitätsanforderungen an Laboratorien, Qualitätspolitik, Instrumente des Qualitätsmanagements, Akkreditierung
- Literaturangaben, Glossar, Tabellen, Berechnungsbeispiele, Abbildungen

Der methodische Leitfaden wurde von sechs Fachleuten erarbeitet, die ihre jahrzehntelange Erfahrung mit der sachverständigen Feststellung von Brandursachen in diesem Leitfaden bündeln.