

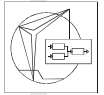
Prof. Dr.-Ing. habil. Norbert Woywode

Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Doz. Dr.-Ing. Fritz Weikert

Beyendorf

Qualitäts- und Sicherheitsprobleme in der Schweißtechnik



0 Einleitung

Qualitäts- und Sicherheitsprobleme begleiten jeden Produktionsprozess. Über bestehende Zusammenhänge zwischen Qualität und Sicherheit, deren Kenntnis beispielsweise für die Vorbereitung und Leitung von Produktionsprozessen sowie für die Aus- und Weiterbildung von Fachleuten von großem Interesse wäre, gibt es bisher wenig verlässliche Informationen. Der Einfluss technischer Entwicklungen auf das Unfallgeschehen ist unstrittig, wobei tendenziell gilt, dass mit wachsendem technologischem Niveau auch das Sicherheitsniveau von Produktionsprozessen ansteigt.

Der Begriff „Sicherheit“ bezieht sich dabei auf den Gesundheits-, Arbeits- und Brandschutz im weitesten Sinne, wobei Havarie- und Explosionsschutz impliziert sein sollen [1].

Qualität ist die Summe aller Merkmale und Eigenschaften, die ein Produkt oder eine Dienstleistung zum Erfüllen vorgegebener Forderungen geeignet macht [ISO 8402]. Die bisher traditionelle Auffassung des Inhaltes der Qualität als

- Qualität der Produkte – Produktionsorientierung,
- Qualität der Arbeitsabläufe und -verfahren,
- Qualität der Arbeitsbedingungen,
- Qualität der Außenbeziehungen

wird zunehmend erweitert um die Bereiche

- Prozessorientierung (Arbeitsorganisation),
- Tätigkeitsorientierung (Unternehmensethik) sowie
- Umweltorientierung (Markt- u. Kundenbedürfnisse)

und ist in diese komplexe Betrachtungsweise einzubeziehen. Die Sicherheit ist dabei als Bestandteil der Qualität zu betrachten. Qualität ist also nicht nur eine Frage des konstruktiven Details, der technologischen Vorbereitung, der Vorfertigung und der Bauausführung, sondern auch der Erzeugnisentwicklung, des Projekts und der Kundenwünsche. Man hat daher auch international gute Ergebnisse mit der Ausarbeitung und Nutzung komplexer Qualitätssicherungs- (QSS) und Qualitätsmanagementsysteme (QMS) erreicht, in die der Arbeits-, Gesundheits- und Umweltschutz integriert ist.

Ergebnisse über qualitative und quantitative Untersuchungen von Gemeinsamkeiten im Ursachengefüge von Qualitätsverletzungen und Verstößen gegen die Arbeitssicherheit im Industrie- und Spezialbau werden von NOWAK [2] dargestellt.

Von grundsätzlicher Bedeutung ist die Feststellung, dass es zwischen Unfällen und Schadensfällen einerseits sowie Qualitätsmängeln andererseits in einem Umfang von etwa 50% Gemeinsamkeiten im Ursachengefüge gibt. Zu ähnlichen Ergebnissen kommen RÖBENACK und SCHÜLER [3] bei Untersuchungen zu Absturzunfällen in Verbindung mit Abbrucharbeiten, wobei

- Beeinträchtigung der Standsicherheit bei Bauwerken,
- unsachgemäß ausgeführte Arbeiten,
- Mängel in der technologischen Vorbereitung



Schwerpunkte darstellen. Eine Analyse von ca. 600 Schadensfällen in [4] ergab, dass 75 % durch Pflichtverletzungen von Menschen und menschliches Versagen verursacht wurden. Drei Viertel der Tragwerksschäden sind also auf den Faktor Mensch zurückzuführen.

Ähnliches ergab sich bei statistischen Untersuchungen der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin für den Zeitraum 1995–1997. Danach lagen die Ursachen der tödlichen Instandhaltungsunfälle rund 50 % in Verhaltensfehlern und 30 % in Organisationsmängeln [3]. Diese Ergebnisse stimmen in ihrer Tendenz mit einer Reihe von Aussagen überein, die in den letzten Jahren nicht speziell für das Bauwesen, sondern allgemein für die Industrie oder Teilgebiete getroffen wurden.

Aus dieser Tatsache lässt sich sowohl bei der Unfall- und Brandverhütung als auch bei der Qualitätssicherung Nutzen ziehen. An Hand einiger Beispiele soll im Beitrag gezeigt werden, wie durch Qualitätserhöhung auch die Sicherheit erhöht und Schadensfälle, Unfälle, Gesundheits- und Brandgefahren beim Schweißen vermindert werden können:

1. Durch Verlagerung der Außenmontage in den Fertigungsbetrieb in Verbindung mit Qualitätssystemen (QSS);
2. durch qualifizierte Arbeitsvorbereitung und Unterweisung – Verminderung des Schwerpunktes Absturzunfälle;
3. durch verbesserten vorbeugenden Gesundheits- und Arbeitsschutz Verringerung der Berufskrankheiten, insbesondere von Atemwegserkrankungen;
4. durch konkrete Brandschutzmaßnahmen – Senkung der Brandgefahr sowie
5. durch Schadensanalysen, um ein Wiederholen solcher Schäden bei der Beseitigung von technischen und menschlichen Versagensursachen weitgehend auszuschließen.

1 Verlagerung der Außenmontage in den Fertigungsbetrieb in Verbindung mit QSS

Während die bisher gefertigten Dampfrohrenkalzinatoren in transport- und montagefähigen Baugruppen ausgeliefert und in der Außenmontage beim Auftraggeber montiert wurden, sind die 400t/d – Dampfrohrenkalzinatoren neu konstruiert und komplett bis zum fertigen Erzeugnis im Betrieb montiert worden (Bild 1). Hierdurch wurde eine Verringerung des Außenmontageanteils, eine Verringerung der Unfallgefahr bei der Außenmontage und eine Verbesserung der Qualität erreicht.



Bild 1 Dampfrohrenkalzinator 400t/d, im Betrieb komplett montiert

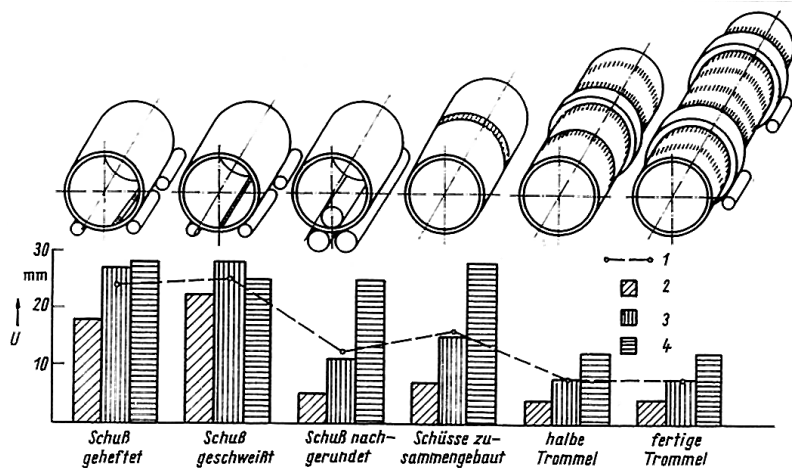
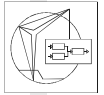


Bild 2 Entwicklung der Formabweichungen an der Trommel des Dampfröhrencalzinator

In den einzelnen Prozessstufen bis hin zur Endmontage wurde auf der Grundlage der Messungen, der Berechnungen und der entwickelten Messtechnik ein System erarbeitet, das es gestattet, durch Vorbestimmung der zulässigen Abweichungen in den qualitätsbestimmenden Prozessstufen eine derartig hohe Genauigkeit zu erreichen, dass die geforderte Endtoleranz nicht überschritten wird. Hierdurch wurde ein zwängungsarmer Zusammenbau mit höherer Qualität und geringerer Unfallgefahr in der Fertigung erreicht (Bild 2) [5].

Heute werden diese Erzeugnisse nach dem ASME-Code¹, einem Qualitätssicherungssystem, das sehr stark produktbezogen ist, hergestellt. Schwerpunkt in diesem System, welches in einem Qualitätskontrollhandbuch beschrieben ist, bilden neben der Konstruktion und der Materialbeschaffung in besonderem Maße das Schweißen und die Arbeitssicherheit.

2 Verminderung des Unfallschwerpunktes Absturzgefahr

Im Bild 3 sind die tödlichen Arbeits- und Wegeunfälle im Bereich der gewerblichen Berufsgenossenschaften der letzten 10 Jahre dargestellt. Ca. 1/3 – nach JÄGER [6] auf Baustellen sogar 54 % der tödlichen Arbeitsunfälle – sind Absturzunfälle, die sich meist von hochgelegenen Arbeitsplätzen auf Grund von

- Qualitätsmängeln und/oder
- Nichtbeachten der Sicherheitsmaßnahmen (Verhaltensfehler) ereignen.

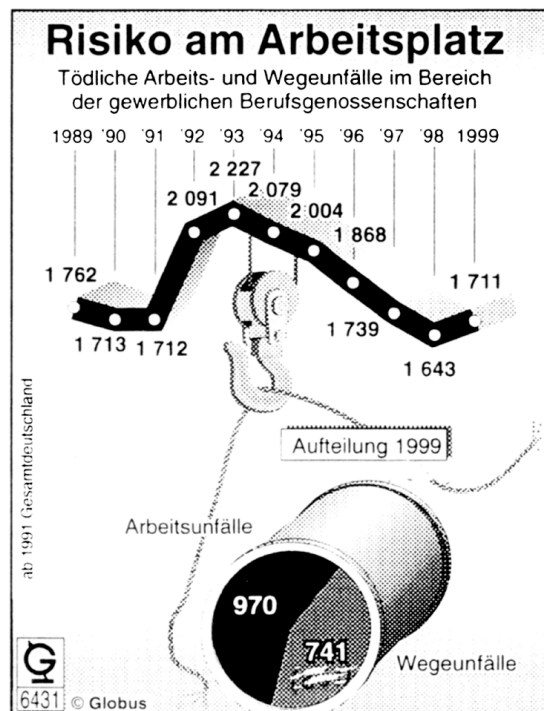


Bild 3 Tödliche Arbeits- und Wegeunfälle 1989–1999

¹ ASME – American Society of Mechanical Engineers



• **Beispiel für einen tödlichen Absturzunfall eines Schweißers**

Ein Schweißer sollte Schweißarbeiten an einer hoch gelegenen Rohrleitung ausführen. Die Stoßvorbereitung war nicht qualitätsgerecht ausgeführt. Da legte er eine Leiter an, nahm den Brenner, stieg auf die Leiter und wollte den Stoß passgerecht brennen. Durch fehlende Sicherung rutschte die Leiter weg, der Schweißer stürzte aus ca. 2m Höhe herunter und verstarb an den Kopfverletzungen. Im Bild 4 ist dazu ein Fallbeispiel gegeben [3]. Bei Beachtung der Sicherheitsvorschriften könnten tödliche und weitere Absturzunfälle vermieden werden.

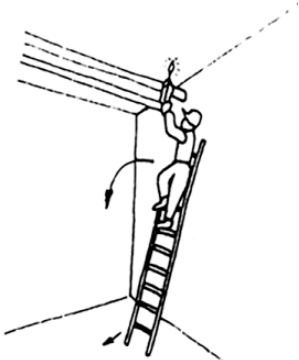
Sachverhalte/Ereignisbereich	Ursachenfaktoren/Absturzort: Leiter	Schadensverhütung/Unfallgruppe
Demontage von Rohrleitungen durch Brennschneiden 	<ul style="list-style-type: none"> • Seitliches Wegrutschen des Leitenden bei fehlender Sicherung durch Glätte der Wand und Einwirkung von Horizontalkräften durch den Arbeitenden (Gewichtsverlagerung) • Verzicht auf das Aufstellen einer ordnungsgemäßen Rüstung • Gewohnheit, Sorglosigkeit 	<ul style="list-style-type: none"> • Ausführendes Unternehmen • Prüfung der Zulässigkeit der Verrichtung der vorgesehenen Arbeit von der Leiter aus • standsicheres Aufstellen der Leiter • Verwendung von Bockgerüsten • Zu beachtende Vorschriften <ul style="list-style-type: none"> – BGV A1 § 18 Abs. 1, 2 § 33 Abs. 1, 2, 3 – BGV C22 § 6 Abs. 1 § 12 Abs. 1 – BGV D36 § 5, 6, 7 Abs. 1.2 §§ 9, 21

Bild 4 Fallbeispiel eines Absturzunfalls

Charakteristische Ursachen für Arbeitsunfälle bei Schweiß- und Schneidarbeiten sind in Tabelle 1 dargestellt [7]. Daraus ist zu erkennen:

- Verbrennungen und Augenverletzungen machen den größten Anteil aus.
- Fast jeder fünfte Unfall geschieht durch Umstürzen oder Herabfallen von Arbeitsgeräten und Arbeitsmitteln.
- Verletzungen bei Transport- und Lagerarbeiten liegen in der gleichen Größenordnung und sind zu einem großen Teil auf wechselnde Arbeitsplätze auf Baustellen zurückzuführen.
- Der Ereignisbereich „Arbeitsplätze“ ist für nicht ortsfeste Tätigkeiten kennzeichnend. Insgesamt jeder zehnte Arbeitsunfall hat seine Ursache in Stürzen.

Innerhalb der Unfallbilanz von Baustellen nehmen Schweißunfälle etwa 3 % ein. Die statistischen Angaben und Ursachenermittlung sollen dazu beitragen, dass durch qualifizierte Arbeitsvorbereitung, Kontrolltätigkeit und Unterweisungen die Gefahr vermindert und die Sicherheit erhöht wird.

3 Verringerung der Berufskrankheiten, insbesondere Atemwegserkrankungen, durch verbesserte vorbeugende Gesundheits- und Arbeitsschutzmaßnahmen

Die Anzahl der Todesfälle infolge Berufskrankheiten der letzten 9 Jahre sowie den prozentualen Anteil der am häufigsten auftretenden anerkannten BK zeigen die Bilder 5a und b. Die tödlich wirkenden Berufskrankheiten gehen meist auf Erkrankungen der Atemwege aufgrund anorganischer Stäube zurück, vor allem Silikose und Asbestose.

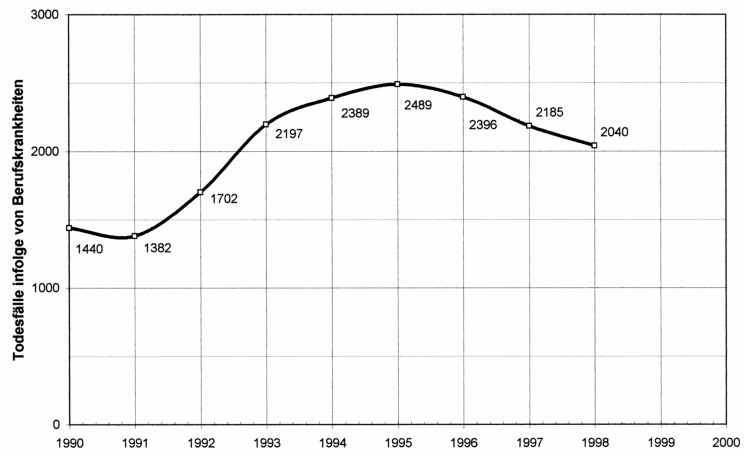
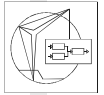


Bild 5a Todesfälle infolge von Berufskrankheiten

Tabelle 1 Arbeitsunfälle bei Schweiß- und Schneidarbeiten (ausgewertet wurden 408 Fälle) [7]

Ereignisbereich	Anteil %	Anteil %
unmittelbare Arbeitsausführungen	61	
Verbrennungen ohne Augenverletzungen		
durch Spritzer, Funken, heiße Arbeitsgeräte und Arbeitsmittel		14
durch Autogenflammen		14
durch Lichtbögen		1
Splitterverletzungen ohne Augenverletzungen (Rost, Zunder, Stahl)		1
Augenverletzungen		
durch Fremdkörper		10
durch Verblitzen		2
Verletzungen durch Um- oder Herabfallen von Arbeitsgeräten und Arbeitsmitteln		
durch geschweißte oder brenngeschnittene Konstruktionsteile		16
durch Arbeitsmittel (z. B. Schlackehämmer)		2
Stromeinwirkung beim Lichtbogenschweißen		1
Transport- und Lagerarbeiten	16	
Verletzungen beim Transport und Lagern von Druckgasflaschen		
durch Um- oder Herabfallen, Verrutschen		7
durch sonstige Ursachen		4
Transport und Umsetzen von Schweißstromquellen		2
Transport und Umsetzen von Schweißteilen		2
sonstige Transport- und Lagerarbeiten		1
Arbeitsplätze	16	
Absturzunfälle		3
Fallen durch ungenügende Trittsicherheit (Stolpern über Kabel und Schläuche, Ausgleiten auf Stabelektroden- und Schweißdraht- bzw. Schweißstabresten usw.)		7
Stichverletzungen durch Stabelektroden- und Schweißdraht- bzw. Schweißstabreste		2
Verbrennungen und Verbrühungen durch heiße bzw. in Brand geratene Medien (Kondensat, Dampf, Waschbenzin, Hydrauliköl, Anstrichstoffe)		4
Sonstiges	7	
Körperliche Überanstrengungen, Spielerei, Versagen von Schweißteilen, frei werdende Spannungen, Witterungs- und Beleuchtungsverhältnisse		7

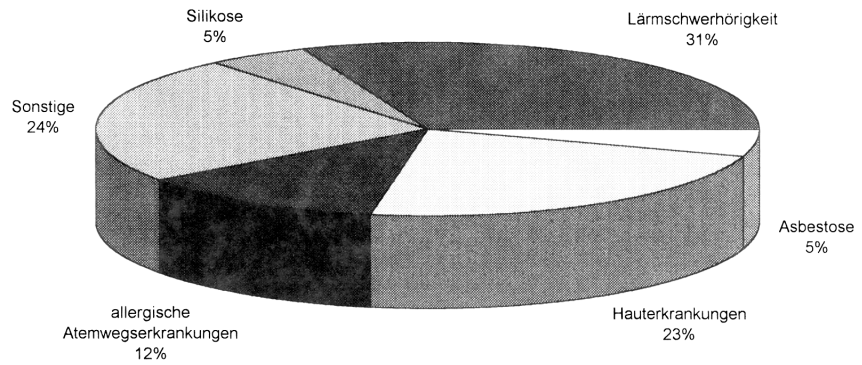


Bild 5b Die häufigsten anerkannten Berufskrankheiten 1990–1999

• **Beispiel für eine BK-Ermittlung eines Schweißers**

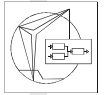
Name/Alter:	.../59 Jahre
Art des Betriebes:	Stahlbau
BK-Nr. 4103:	Asbeststaublungenerkrankung (Asbestose) oder durch Asbeststaub verursachte Erkrankung der Pleura
Krankenverursachende Stoffe:	Asbest
letzte BK-bezogene Tätigkeit/Dauer:	Schweißer/20Jahre 1958–1978
Arbeitsbereich:	Beim Schweißen von Glühöfen hatte er Kontakt zu asbesthaltigen Materialien. In der Halle wurden auch Isolierungen der Glühöfen mit asbesthaltigem Material durchgeführt.
Sterbetag:	...1996
Erstmalig festgestellte Schäden/Art:	...1989/Bronchialerkrankung mit bestehender schwerer chronisch-obstruktiver Bronchitis

Die am häufigsten auftretenden anerkannten Berufskrankheiten bei Schweißern sind:

- Lärmschwerhörigkeit BK-Nr. 2301 mit ca. 71 %
- Erkrankung der Atemwege BK-Nr. 4103-5 mit ca. 14 %
- Obstruktive Atemwegserkrankungen BK-Nr. 4301-2 mit ca. 4 %

Lärmschwerhörigkeit

Lärmschwerhörigkeit beruht auf einem bleibenden Schaden des Innenohres, der durch dessen chronische Überforderung infolge erheblicher Lautstärke zustande kommt. Das Ausmaß der Schwerhörigkeit hängt von der Intensität des Lärms und seiner Einwirkungsdauer ab. Wir können davon ausgehen, dass die meisten Schweiß- und Schneidverfahren in ihrer Lärmintensität über 85 dB(A) liegen. Damit sind die Arbeitsplätze der Schweißer und Brennschneider Lärm Arbeitsplätze. Hinzu kommen die Lärmeinflüsse der Umgebung, insbesondere im Maschinen-, Stahl- und Behälterbau, so dass dieser hohe Prozentsatz um ca. 71 % bei Schweißern nicht ungewöhnlich ist. Besorgnis erregend ist allerdings das Anwachsen der Lärmschwerhörigkeit in den letzten Jahren und dass von den neuen Lärm-BK-Renten etwa 4 % auf die Berufsgruppe Schweißer entfallen, wobei die Schweißer nur etwa 0,25 % der übrigen Versicherten ausmachen.



Erkrankungen der Atemwege und Lungen

Bei den Erkrankungen handelt es sich insbesondere um:

- Asbeststaublungenerkrankungen (Asbestose) oder durch Asbeststaub verursachte Erkrankung des Rippenfells,
- Lungenkrebs in Verbindung mit Asbestose; durch Asbeststaub verursachte Erkrankung des Rippenfells bei Nachweis der Einwirkung einer kumulativen Asbeststaubfaserdosis am Arbeitsplatz von mind. 25 Faserjahren,
- durch Asbest verursachtes Mesotheliom des Rippen-, Bauchfells oder des Herzbeutels [8],

welche bei Schweißern besonders in den letzten Jahren immer häufiger auftreten. Die Ursachen liegen darin, dass einige Schweißer in der Vergangenheit über längere Zeit ihre Arbeit bei Einatmung von Asbeststaub ausgeführt haben und die Latenzzeiten (30er Regel nach SELIKOFF) erreicht haben.

Der Anteil dieser Arten von Berufskrankheiten bei Schweißern liegt bei 14 %, wobei die Asbeststaublungenerkrankungen 1994 steil anstieg. Obwohl der Umgang mit Asbest verboten bzw. bei Instandhaltungs-, Abbruch- und Sanierungsarbeiten sehr stark reglementiert ist und die Ursachen für derartige Erkrankungen kaum noch vorhanden sind, werden diese schweren, oft unheilbaren Erkrankungen noch einige Jahre auftreten. Der Gipfel wird in den Jahren 2005–2010 erwartet.

Obstruktive Atemwegserkrankungen

Sie werden hervorgerufen durch:

- allergische Stoffe (einschließlich Rhinopathie) BK 4301 und
- chemische irritativ oder toxisch wirkende Stoffe BK 4302,

die zur Unterlassung aller Tätigkeiten gezwungen haben, die für die Entstehung, die Verschlimmerung oder das Wiederauftreten der Krankheit ursächlich waren oder sein können [8].

Bei Schweißern können die Ursachen solcher Erkrankungen sowohl in der häufigen und langzeitigen Überschreitung der Grenzwerte Maximale Arbeitsplatzkonzentration (MAK) als auch in der Überschreitung der technischen Richtkonzentration (TRK) liegen. Langfristige – in der Regel jahrelange – Einwirkung MAK-Wert-überschreitender Konzentrationen von Phosgen, Stickoxiden, Ozon (Reizgase) können ebenfalls dazu führen. Der Verlauf berufsbedingter obstruktiver Lungenkrankheiten entspricht weitgehend dem bei außerberuflicher Krankheitsentstehung. Abhängig vom Erkrankungsstadium kann es nach Beendigung der Schadstoffexposition sowohl zur Besserung als auch zum weiteren Fortschreiten der Erkrankung kommen. Beim Raucher ist der Erfolg dann zu erwarten, wenn in Verbindung mit dem Arbeitsplatzwechsel das Rauchen aufgegeben wird.

Aus eigenen Untersuchungen geht hervor, dass obstruktive Atemwegserkrankungen bei Schweißern in Deutschland durch allergische Stoffe nur in Einzelfällen (bis 5 Fälle pro Jahr), jedoch häufiger durch chemisch-irritativ oder toxisch wirkende Stoffe (1 bis 13 Fälle pro Jahr) auftreten. Insgesamt beträgt der Anteil dieser BK bei Schweißern ca. 4 %. Die obstruktiven Atemwegserkrankungen entstehen ausschließlich durch längerfristige Einatmung der o. g. Stoffe und können am wirksamsten

- durch schadstoffarme Schweißverfahren, z. B. WIG- oder UP-Schweißen,
- durch Absaugung an der Entstehungsstelle mit Hilfe von Einzelplatzabsauganlagen oder Hochvakuumanlagen mit speziellen Erfassungselementen, auch schutzschirm- oder brennerintegriert,

vermieden werden.



Schlussfolgerung

400 bis 500 anerkannte Berufskrankheiten bei Schweißern im Jahr stellen Einschnitte in das Leben der Kollegen und Mitarbeiter dar, die von Lärmschwerhörigkeit (oft verbunden mit sozialer Isolierung) bis hin zu schwer wiegenden Erkrankungen der Atemwege und der Lungen mit Todesfolge reichen.

Die Ursachen dieser Erkrankungen sind nicht in der unmittelbaren Gegenwart zu suchen, sondern liegen meist viele Jahre zurück.

Es gilt aber, die gegenwärtigen Möglichkeiten zu nutzen, um zukünftig Berufskrankheiten zu vermindern durch:

- Einsatz schadstoff- und lärmarmen Verfahren, Maschinen und Anlagen,
- Erarbeitung und Realisierung von Lärminderungsmaßnahmen und -programmen,
- effektive Absaugtechnik an der Entstehungsstelle,
- systematische Vorsorgeuntersuchungen der Schweißer.

4 Verringerung der Brandgefahr durch konkrete Brandschutzmaßnahmen

Während die Brandschadensleistungen der Industrie-Feuer- und FBU-Versicherungen in den alten Bundesländern in den 80er Jahren noch unter 2 Mrd. DM/a lagen, stiegen sie in den 90er Jahren auf über 2 Mrd. DM/a an. Trotz Hinzukommens der neuen Bundesländer vor 11 Jahren liegen sie im Schnitt um 3 Mrd. DM/a (Bild 6) [GDV.de], wobei ein Abwandern der Industrie von der Feuer- in Allgefahren- und Elementen-Schadensversicherungen nicht unerwähnt bleiben darf. Neben diesen Schäden, z. B. zerstörte Industriegebäude, Produktionsstätten, Verkehrs- und Versorgungseinrichtungen sowie vernichtete Rohstoffvorräte oder Warenbestände, kommt es zu Folgeschäden, die im Durchschnitt das 10 bis 20fache betragen. Sie wirken insbesondere als Störungen in der Produktion, im Verkehr und in anderen Bereichen, z. B. Ausfall von Energieanlagen und Schädigung der Umwelt. Durch Brände sterben aber auch jährlich ca. 1.200 Menschen in Deutschland. Die Schadenssumme der durch Schweißen und Schneiden verursachten Brände beträgt 3–5 % der Brandschadensleistungen in der Industrie.

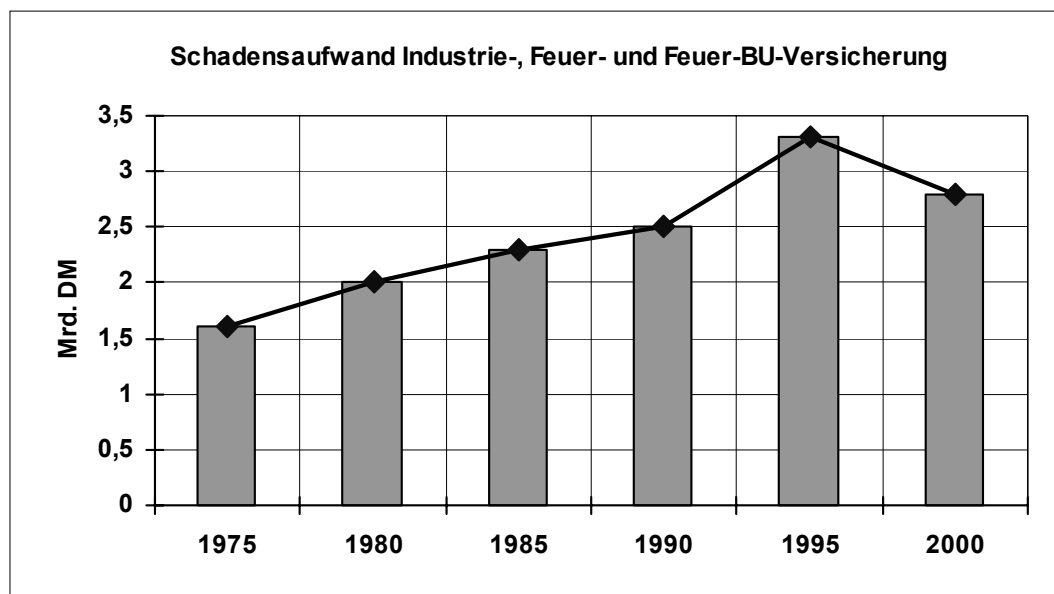


Bild 6 Brandschadensleistung in der BRD (Industrie-Feuer-Versicherung)

- **Brand einer Rauchgasreinigungsanlage durch Schweißen [9]**

Nach Übergabe des Reingaskanals von der Stahlbaufirma an die Beschichtungsfirma wurde in der Nähe des Kompensatorspaltes noch eine Fehlstelle im Stahl bemerkt, die zur Erlangung einer beschichtungsgerechten Oberfläche noch mit einer etwa 2 cm langen Schweißraupe gefüllt werden sollte. Beim Schweißen entzündeten herabfallende Funken den Moosgummi der Kompensatorspaltabdeckung. Trotz sofortiger Löschmaßnahmen konnte der Entstehungsbrand mit starker Rauchentwicklung nicht eingedämmt werden.

Der Brand griff rasch innerhalb des Kanals auf die bereits fertig gestellte Wäscherummierung und die Kunststoffeinbauten über. Der Wäscher einschließlich der direkt anschließenden Rohrleitungen, Teilen der Rauchgaskanäle sowie bereits installierter Anlagen, Elektro- und Leittechnikkomponenten brannten völlig aus (Bild 7).

Der Schaden beläuft sich auf etwa 70 Mill. DM; die Inbetriebnahme der REA verzögert sich durch Abbruch- und Neuerrichtungsarbeiten um fast 2 Jahre. Aus diesen Brand wurden Konsequenzen für die weitere Brandschutzvorsorge der REA-Baustellen gezogen.

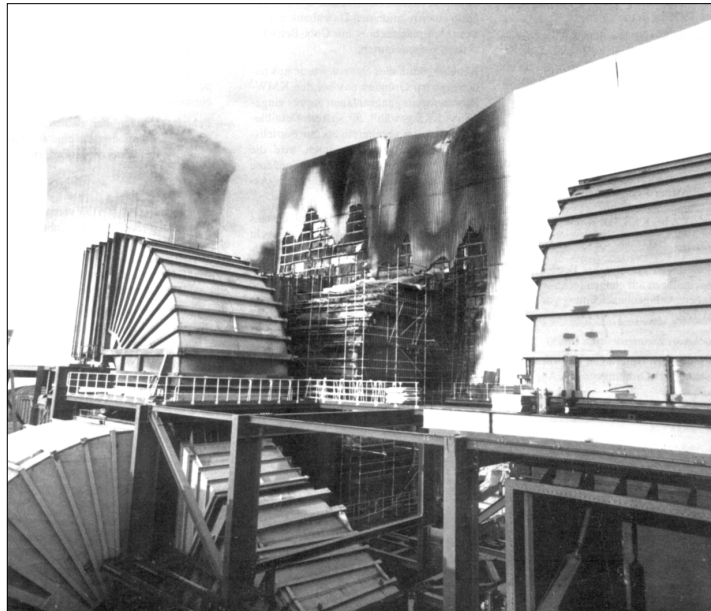


Bild 7 Ausgebrannte Rauchgasreinigungsanlage

Neben der bis zum Brandereignis üblichen Brandschutzvorsorge wurden

- administrative Maßnahmen und
- technische Maßnahmen

eingeleitet.

Die neu erarbeiteten Brandschutzmaßnahmen fanden ihren Niederschlag in einem Merkblatt der VGB „Brandschutzmaßnahmen in Rauchgasreinigungsanlagen“, die auch bei der Revision von REAs zu beachten sind. In den letzten Jahren traten keine nennenswerten Brände bei REAs auf.

5 Schadensanalyse und technische Entwicklung

Schadensfälle an Bauwerken, Industrieanlagen und technischen Erzeugnissen allgemein sind seit jeher nicht nur unter ingenieurtechnischen Gesichtspunkten für diejenigen Personen und Institutionen von Bedeutung, die unmittelbar von dem Schadensereignis betroffen sind, sondern sie werden je nach ihren Auswirkungen meistens auch mit mehr oder weniger öffentlichem Interesse verfolgt. Eine Schadensanalyse sollte daher stets mit dem Ziel erfolgen, ein Wiederholen solcher Schäden durch Beseitigen von technischen und menschlichen Versagensursachen weitgehend auszuschließen. Das hat im Verlauf der technischen Entwicklung maßgeblich zur Vertiefung wissenschaftlich-technischer Erkenntnisse geführt.

Diese allgemeinen Feststellungen treffen auch für Schadensbeseitigungen und Schadensanalysen an geschweißten Bauteilen und Konstruktionen zu. In nicht unerheblichem Maße wurden wissenschaftliche Untersuchungen, z. B. zur Verbesserung der Schweißbarkeit und insbesondere der Sprödbruchsicherheit der Baustähle, durch katastrophale Schäden an geschweißten Brücken und Schiffen in den dreißiger und vierziger Jahren ausgelöst. Obwohl das technische Wissen um die von vielen Einflüssen



geprägte Eigenschaft Tragfähigkeit geschweißter Metallkonstruktionen heute im Wesentlichen als gesichert gilt, nehmen Schäden an geschweißten Konstruktionen in fast allen Anwendungsbereichen nicht ab, sondern eher zu. Die Ursachen dafür sind sehr vielfältig und sollen im Rahmen dieses Beitrages nicht erörtert werden. Ein Instandsetzen von zu Schaden gekommenen Bauteilen durch schweißtechnische Maßnahmen sollte aber stets mit einer Schadensanalyse und mit einer Abschätzung der noch verbleibenden Restlebensdauer der betreffenden Konstruktion verbunden sowie von Hinweisen zur Verbesserung der Qualität der konstruktiven Auslegung und/oder der technologischen Ausführung begleitet werden.

Hauptursachen von Schäden

Auswertungen von Schadensfällen an geschweißten Konstruktionen führen zu der Erkenntnis, dass Schäden häufig durch eine Überlagerung gleichzeitig vorhandener Mängel in der schweißgerechten Gestaltung, in der qualitätsgerechten Fertigung, durch Abweichungen vom planmäßigen Betrieb, z. B. durch Überlastungen und/oder durch menschliches Versagen, ausgelöst werden. Dennoch ist es sehr wichtig, vor Beginn einer Instandsetzung die Hauptursachen, die zu dem Schadensereignis geführt haben, festzustellen. Erst mit der Kenntnis der Hauptursachen können die richtigen Entscheidungen, z. B. für eine mögliche Reparaturschweißung, getroffen werden. Hauptursache von Schäden an geschweißten Konstruktionen sind im Allgemeinen:

- Unterdimensionierungen der Konstruktionsquerschnitte und Schweißverbindungen,
- Überlastungen durch nicht funktionsgerechten Betrieb,
- ungünstige konstruktive Gestaltung in Hinblick auf die dynamische Beanspruchung,
- Fertigungsfehler und Qualitätsmängel bei der Ausführung der Schweißverbindungen,
- ungeeignete Werkstoff- bzw. Zusatzwerkstoffauswahl,
- grobe Missachtung geltender technischer Regeln und Vorschriften.

Die Kenntnis der Hauptursachen eines eingetretenen Schadens ist für die sachgemäße Instandsetzung und Abschätzung der verbleibenden Restlebensdauer, für die konstruktive Veränderung von Querschnittsabmessungen und Schweißnahtdetails ebenso bedeutsam wie für die juristische Entscheidung für die bei den meisten Schäden und Havarien anstehende Schadensregulierung.

Beispiele von Schäden an geschweißten Konstruktionen mit Diskussion der Schadensursachen

- **Havarie eines Druckwasserstoffbehälters infolge örtlicher Imperfektionen im Schweißnahtbereich einer Längsnaht [10]**

Hauptparameter des geborstenen Druckbehälters:

- Volumen 100 m³
- Durchmesser 2800 mm
- Gesamtlänge 19 m
- Wanddicke 22 mm
- Werkstoff TTStE 47
(min $R_e \cong 450 \text{ N/mm}^2$; min $R_m \cong 600 \text{ N/mm}^2$)

Bauart: Zylindrischer Behälter, bestehend aus 7 längsnahtgeschweißten Schüssen und 2 Korb-bogenböden, stehend auf einer Standzarge

Betriebsweise:

- Max $p_B = 45 \text{ bar}$
- 4x pro Woche nachgefüllt, so dass $p_B \approx 15...45 \text{ bar}$
($\hat{=}$ nach AD-Merkblatt S1 300 Volllastspielen/a von 0...45 bar)
- Betriebsdauer rd. 15 Jahre

Schadensablauf:

Der Zerknall des Behälters trat am Sonnabend, dem 5. Oktober 1991, gegen 5:12 Uhr morgens, im Chemiewerk in Hanau ein, 38 Minuten, nachdem ein Füllvorgang beendet worden war (Bild 8 a-c).

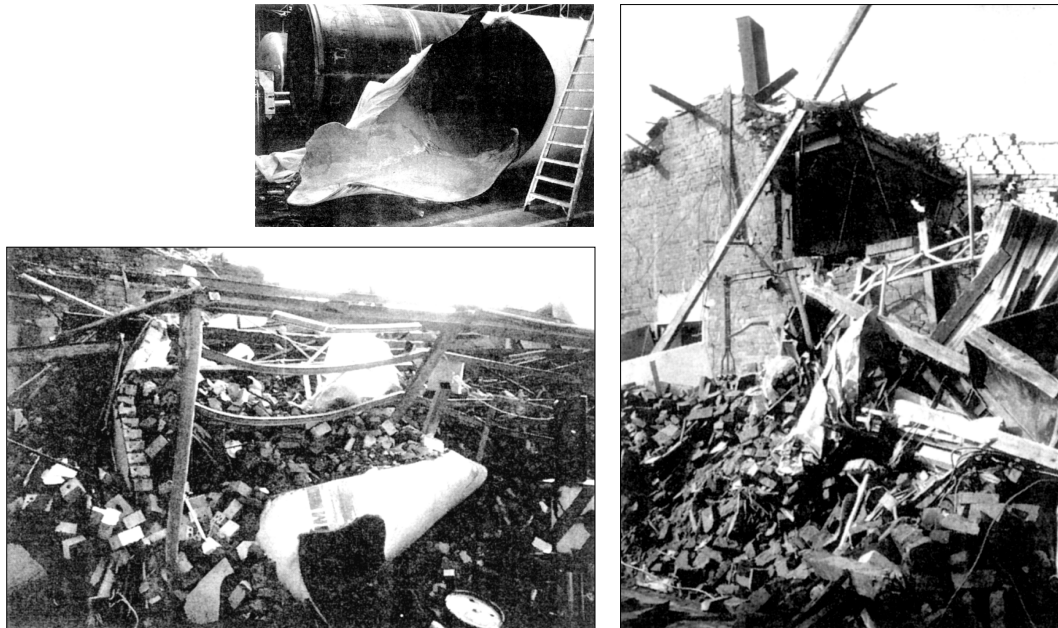
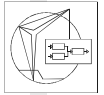


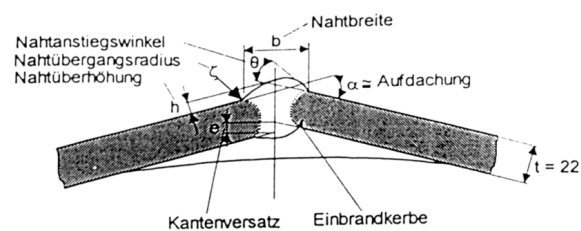
Bild 8 a-c Behälter und Fabrikgebäude nach der Explosion [2]
 Behälter nach der Explosion (links oben)
 Behälterbauteile nach der Explosion in den Trümmern des Fabrikgebäudes (links unten)
 Schäden an einem Fabrikgebäude (rechts)

Dabei wurde der obere Teil des Behälters in 5 Teile zerlegt, die unterschiedlich weit weggeschleudert wurden. So flog z. B. das Kalottenteil des oberen Bodens in einer ballistischen Kurve bis zum 300 m entfernten Bahnhof. Der aus dem Behälter austretende Wasserstoff vermischte sich mit der Luft und entzündete sich. Die dabei entstandene Druckwelle zerstörte bzw. beschädigte bis in eine Entfernung von ca. 1 km Dächer und Glasscheiben.

Die Schadenssumme ist exorbitant hoch. Es wird ein Betrag von über 100 Millionen Mark genannt. Personen sind erstaunlicherweise kaum verletzt worden, was bei diesem Explosionsvorgang als außerordentlich unwahrscheinliche, jedoch sehr glückliche Fügung angesehen werden muss.

Schadensursache:

Neben der Versprödung durch Wasserstoff war vor allem eine Längsnaht eines der 6 Behälterschüsse mit unzulässig großen Schweißnahtimperfectionen offensichtlich bei der Bauteil-inbetriebnahme übersehen worden. Diese Längsnaht riss von innen her nach und nach immer weiter durch, bedingt durch die in Bild 9 dargestellten Schweißnahtfehler. Vor Schadenseintritt war die Wandung örtlich bis auf 2 mm bei einer Risslänge von rd. 780 mm bereits geschädigt worden, bis dann der Behälter endgültig versagte. Bei einer Nachrechnung im Rahmen der Schadensanalyse wurden örtliche Spannungsüberhöhungen vom 3 bis 4fachen der Steckgrenze ermittelt. Diese Spannungsüberhöhung durch Kerbwirkungen infolge Einbrandkerben, Kantenversatz, Winkerverformung (Aufdachung) und Wurzelüberhöhung bewirkte einen Ermüdungsbruch im Schweißnahtübergang bei niederzyklischer Beanspruchung.



Prinzipdarstellung: Abweichung von der Idealform

- Aufdachung: $\alpha \cong 15^\circ$
- Kantenversatz: $e \cong 3 \text{ mm}$
- Nahtbreite: $b \cong t$
- Nahtanstiegswinkel: $\theta \cong 45^\circ$
- Nahtübergangsradius: $\zeta \cong 1$

Bild 9 Vorhandene Nahtunregelmäßigkeiten an der gerissenen Längsstumpfnaht des Druckwasserstoffbehälters

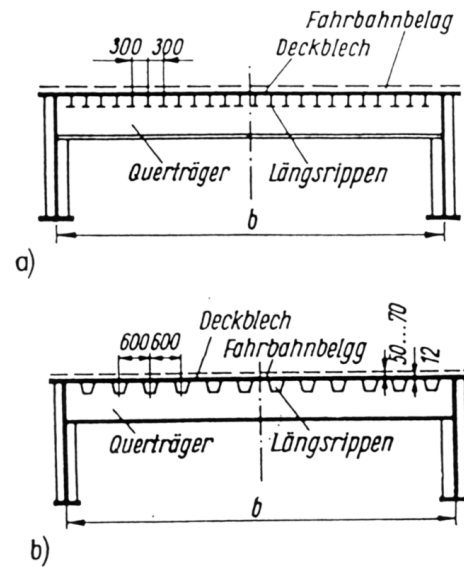
Infolge der hohen Kosten für die Schadensregulierung und zur Vermeidung ähnlicher Havarien wurde 1995 das AD-Regelwerk [11] betreffs Kantenversatz und Aufdachungen bei Druckwasserstoffbehältern einschneidend verändert.



- **Risse in Schweißnähten der Verbindungen von Trapezprofilen mit Querträgern an orthotropen Fahrbahnkonstruktionen einer Straßenbrücke [14]**

Eine orthotrop versteifte Fahrbahnplatte zwischen den Hauptträgern einer Straßenbrücke wies nach rd. 30-jähriger Betriebszeit zahlreiche Risse in den Verbindungsnahten zwischen den längs verlaufenden Trapezprofilen und den Querträgern auf (Bild 11). Die Risse waren offensichtlich durch Qualitätsmängel beim Brennschneiden zur Vorbereitung der Ausschnitte der Querträger hervorgerufen worden, die zu große Toleranzen aufwiesen und dadurch Wurzelspalte bei den Kehlnähten zur Folge hatten. Dadurch wurden die Querschnitte der Kehlnähte entscheidend geschwächt und rissen (Bild 12). Dennoch war die Funktion der Brücke nicht in Frage gestellt, da die Risse durch plastische Verformungen den örtlich zuvor vorhandenen kritischen Spannungszustand „entschärft“ hatten, ein glücklicher Umstand.

Bild 10 Flachblechfahrbahnplatte
 a) orthotrop versteift-offene Längsrippen
 b) Hohl-Längsrippe



Da derartige Fertigungsfehler mit wirtschaftlich vertretbarem Aufwand bei der schweißtechnischen Fertigung derartig versteifter orthotroper Fahrbahnplatten kaum zu vermeiden sind, wurden die Regelwerke [12; 13] inzwischen so verändert (Bild 13), dass diese kritischen Bereiche durch Freischnitt frei von Schweißnähten bleiben.

Die Risse, die auf Grund ihrer Lage weder abgebohrt noch ausgearbeitet und nachgeschweißt werden konnten, wurden belassen. Referenzstellen werden hinsichtlich möglicher Rissfortschritte regelmäßig kontrolliert. Die Fahrbahnkonstruktion wurde in Abstimmung mit dem Projektanten der Brücke im Auflagerbereich der Straßenbahnschienen verstärkt.

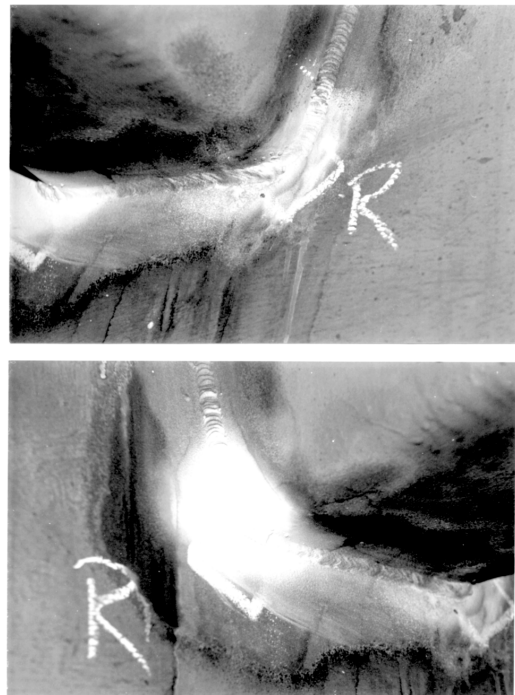


Bild 11 a und b
 Mit Penetriermittel versehene Rissbereiche

Bild 12 (nächste Seite, oben)
 Risse in den Verbindungsstahlnähten zwischen Trapezhohlsteife und Querträger [14]
 Querschliff der Anschlussnähte, vergrößerter Rissquerschnitt mit deutlich erkennbarer Verschiebung der Bruchflächen

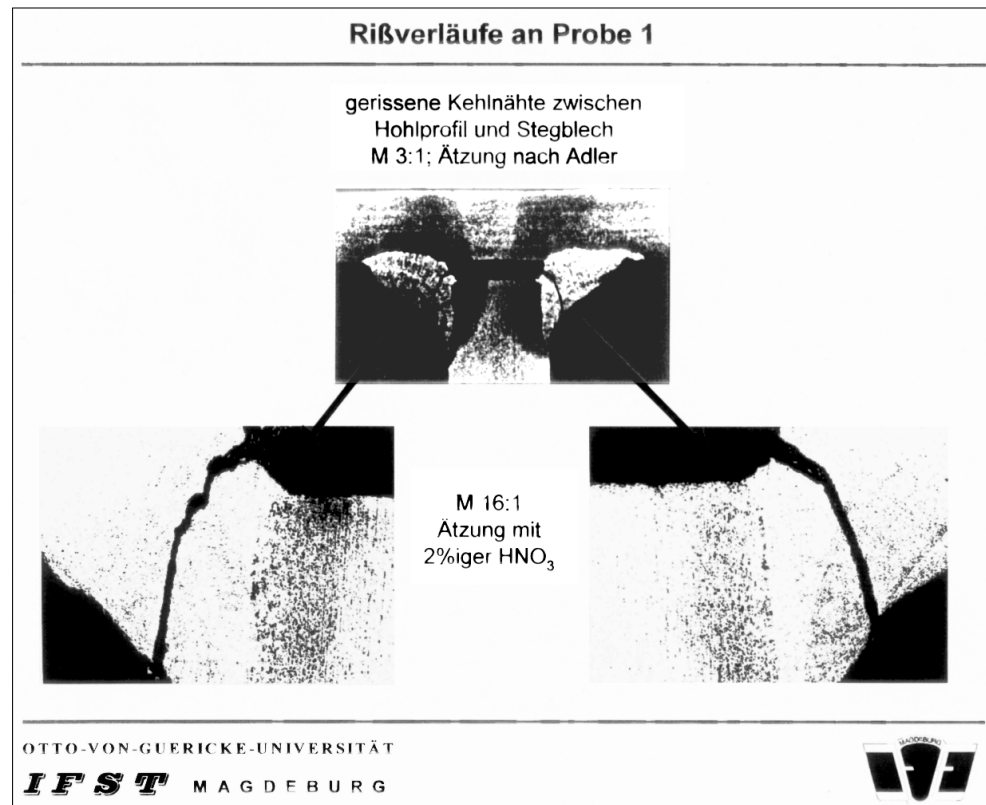
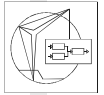
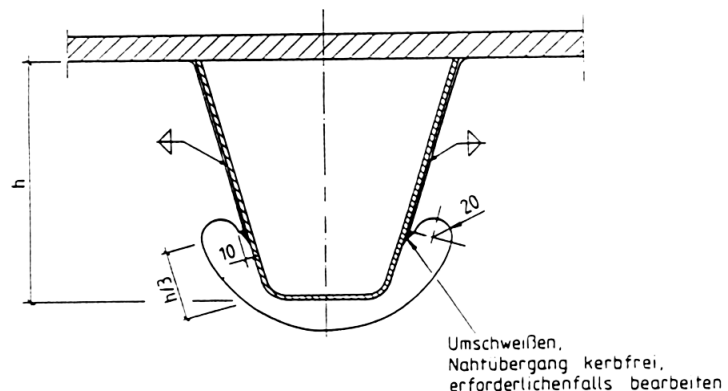


Bild 12

Bild 13 Durchdringungspunkt
Trapezhohlsteife –
Querträgersteg [13]



6 Zusammenfassung

Qualität und Sicherheit sind eng miteinander verknüpft und für effektive Produktions- und Bauabläufe unabdingbare Voraussetzungen. Besonders RÖBENACK und SCHÜLER haben qualitative und quantitative Ergebnisse zu dieser Problematik für das Bauwesen erarbeitet, wie die Auswertung des Schrifttums dazu ergab. Durch diese maßgebenden Arbeiten wurde der Nachweis erbracht, dass es viele Gemeinsamkeiten von Qualitätsverletzungen und Verstößen gegen die Sicherheitsvorschriften gibt. Im Beitrag wurde an Hand einiger Beispiele gezeigt, wie sich durch

- Schwachstellen in der technischen und technologischen Vorbereitung,
- Mängel im Gesundheits-, Arbeits- und Brandschutz,
- ungenügende Qualifikation sowie subjektives Fehlverhalten von Arbeitern,
- Material-, Fertigungs- und Konstruktionsfehler

Unfälle, Schadensfälle, Gesundheitsschäden und Brände insbesondere beim Schweißen ereignet haben und damit die aufgezeigten Zusammenhänge bestätigen.



7 Literatur

- 1 Nowak, B.; Röbenack, K.-D.: Gemeinsamkeiten im Ursachengefüge von Qualitätsverletzungen und Verstößen gegen die Arbeitssicherheit bei Bauprozessen. Wiss. Z. der HAB Weimar, Reihe B. Weimar 38 (1992) H1/2 S. 47–50.
- 2 Nowak, B.: Untersuchungen von Gemeinsamkeiten im Ursachengefüge von Qualitätsverletzungen und Verstößen gegen die Arbeitssicherheit im Industrie- und Spezialbau. Diss. Hochschule für Architekten u. Bauwesen Weimar, 1991.
- 3 Röbenack, K.-D.; Schüler, T.: Untersuchungen von Absturzunfällen bei Abbrucharbeiten und Empfehlung von Maßnahmen zu deren Verhütung. Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedien – Forschung – Fb 894, Dortmund/Berlin 2000.
- 4 Oehme, P.: Statistische Schadensanalyse an Stahltragwerken. Bauplanung – Bautechnik 43 (1989) 4, S. 184–187.
- 5 Weikert, F.: Erhöhung der Bauelementegenauigkeit in der Rundkörperfertigung mit dem Ziel der Rationalisierung der Montage im Chemieanlagenbau. Schweißtechnik 29 (1979) 6, S. 284.
- 6 Jäger, W.; Holland, U.: Sicherheit auf Baustellen. Die Berufsgenossenschaften 5/99, S. 256–263.
- 7 Röbenack, K.-D.; Nowak, B.; Weikert, F.: Welche Schweißerunfälle bei Schweißern auf Baustellen? Der Praktiker 10, Düsseldorf 45 (1993) 10 S. 618–621.
- 8 Liste der Berufskrankheiten nach der zweiten Änderungsverordnung zur Änderung der Berufskrankheiten-Verordnung (BeKV) vom 18. 12. 1992. Verlag: L. Drüninghofen, Berlin.
- 9 Wagner, K.; Hammacher, P.: Der Brand in der Rauchgasreinigungsanlage des Blockes C im Kraftwerk. VGB Kraftwerkstechnik 70 (1990) Heft 10, S. 850–853.
- 10 Dechant, K. E.; Marchner, H.: Sicherheitsbetrachtungen zu Wasserstofflagerbehältern aufgrund eines Behälter-Zerfnalls in Hanau. DVS-Berichte, BD. 159, S. 74–78.
- 11 AD-Merkblatt HP1 – Herstellung und Prüfung von Druckbehältern, Auslegung und Gestaltung, Ausg. 01/95.
- 12 DS 804: Vorschriften für Eisenbahnbrücken und sonstige Ingenieurbauwerke (VEI), Deutsche Bundesbahn, 01/83.
- 13 DIN 18809, Stählerne Straßen- und Wegbrücken; Bemessung, Konstruktion, Herstellung, 09/87.
- 14 Herold, H.; Woywode, N.: Gutachten zur Klärung von Rissen in Schweißnähten einer Straßenbrücke, unveröffentlicht, 1993.