

Abschlussbericht zum PTB-Forschungsvorhaben 37056

Ermittlung der Grenzspaltweite von Gasgemischen in Abhängigkeit von Inertgasanteil und Druck im Überdruckbereich

Laufzeit: 03/2019-07/2020

Autoren: Sabine Zakel, Uwe Hansen, Thomas Stolz

PTB Braunschweig

Fachbereich 3.7: Grundlagen des Explosionsschutzes

Juli 2020

Version 2

Die Autoren danken der Berufsgenossenschaft Rohstoffe und Chemische Industrie (BG RCI) in Heidelberg für die finanzielle Unterstützung.

Inhaltsverzeichnis

1	Motivation.....	1
2	Einleitung	1
3	Material und Methoden	5
3.1	Untersuchte Substanzen und Drücke.....	5
3.2	Versuchsaufbau	5
3.3	Versuchsdurchführung.....	6
3.4	Unsicherheit.....	6
4	Ergebnisse	7
4.1	Konzentrationsabhängigkeit.....	7
4.2	Druckabhängigkeit bei Zusatz von Inertgasen	8
5	Diskussion.....	12
6	Zusammenfassung und Ausblick	13
7	Literaturverzeichnis	13

1 MOTIVATION

In einer Literaturrecherche im Auftrag der BG RCI aus dem Jahr 2014 wurde der Forschungsbedarf hinsichtlich der Wirkung von Inertgasen auf die Grenzspaltweite erläutert [1]. Das Ziel dieses Projektes ist es, diese Lücke zu schließen.

Die Grenzspaltweite ist ein Maß für das Flammendurchschlagsvermögen eines Gases. Wird die Grenzspaltweite unter Umgebungsbedingungen in reiner Luft gemessen, bezeichnet man sie als Normspaltweite oder auch MESG (maximum experimental safe gap). Die Normspaltweite ist eine der grundlegenden Größen im konstruktiven Explosionsschutz. Hierbei werden die Auswirkungen auf Menschen, Material und Umwelt auf ein ungefährliches Maß minimiert, wenn Explosionsvorgänge nicht komplett vermeidbar sind. Die Normspaltweite wird sowohl für die sichere Auslegung druckfest gekapselter Geräte als auch die Auswahl von Flammensperren herangezogen. Nun soll experimentell überprüft werden, ob auch bei Einsatz eines Inertgases die bekannte Druckabhängigkeit der Grenzspaltweite erhalten bleibt und inwieweit die Art des Inertgases sich auf die Durchschlagsfähigkeit des Gemisches auswirkt.

2 EINLEITUNG

Der Abschlussbericht eines BG RCI-Vorhabens aus dem Jahr 2014 fasst eine umfangreiche Recherche zu den Kenngrößen des Explosionsschutzes von Gasen und Dämpfen bei nicht-atmosphärischen Bedingungen zusammen [1]. Eine dieser Kenngrößen ist die Grenzspaltweite (s_G). Die Grenzspaltweite ist ein Maß für das Flammendurchschlagsvermögen eines Gases.

Unter atmosphärischen Bedingungen werden im Sinne der ATEX Direktive 2014/34/EU [2] sowohl Temperaturen zwischen -20 °C bis 60 °C als auch Drücke zwischen 800 mbar bis 1100 mbar verstanden. Bedingungen außerhalb dieser Intervalle und andere Oxidationsmittel als Luft gelten demnach als nicht-atmosphärische Bedingungen.

Die Grenzspaltweite (s_G) ergibt sich aus dem Minimum der durchschlagsicheren Spaltweite über alle Konzentrationen einer brennbaren Substanz im Gemisch mit dem Oxidatorgas, das üblicherweise reine Luft ist (Abbildung 1). Erfolgt die Bestimmung der Grenzspaltweite unter den in der ISO/IEC 80079-20-1 [3] festgelegten Laborbedingungen bei $20\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$ und einem Umgebungsdruck von $103\text{ kPa} \pm 1\text{ kPa}$, wird sie als Normspaltweite oder auch MESG bezeichnet. Erfolgt die Bestimmung außerhalb der Bedingungen der Norm benutzt man zur besseren Unterscheidbarkeit den Begriff Grenzspaltweite.

Die Grenzspaltweite wird in der Apparatur nach ISO/IEC 80079-20-1 [3] bestimmt (Abbildung 2). Die durchschlagsichere Spaltweite (SW) ist die größte Spaltweite, gemessen in Millimetern, zwischen den beiden Teilen der Innenkammer einer

Prüfanordnung, die unter vorgeschriebenen Bedingungen bei Entzündung des im Inneren befindlichen Gasgemisches verhindert, dass das außen befindliche Gasgemisch durch einen 25 mm langen Spalt hindurch gezündet wird. Dieser Wert kann für alle Konzentrationen des geprüften Gases oder Dampfes in Luft bestimmt werden. Das Minimum der resultierenden Konzentrationskurve ist die Grenzspaltweite (s_G). Das größte Flammendurchschlagvermögen liegt dabei nahe oder auch leicht oberhalb der stöchiometrischen Konzentration des Gas- oder Dampf-Luftgemisches. Temperaturen oberhalb der Raumtemperatur sind nur zulässig, um bei Flüssigkeiten den für die Messung notwendigen Dampfdruck einzustellen.

Unterschiedliche Gase und Dämpfe haben ein unterschiedliches Flammendurchschlagsvermögen und werden dementsprechend verschiedenen Explosionsgruppen zugeordnet (Tabelle 1). Die Klassifizierung von explosionsgeschützten Geräten in die entsprechenden Gerätegruppen IIA, IIB und IIC erfolgt ebenfalls auf Basis der Durchschlagsfestigkeit gegen die Prüfgemische entsprechender MESG. Entsprechend werden diese Geräte für das „Oxidationsmittel Luft“ bei leicht erhöhtem Prüfdruck ausgelegt. Da typische reale Einsatzbedingungen aber oftmals abweichende Sauerstoffgehalte und höhere Drücke erfordern, ergibt sich hier die Fragestellung nach der Eignung der Grenzspaltweite als Klassifizierungskriterium. Bisherige Erkenntnisse lassen vermuten, dass sich eine gerätespezifische Grenzspaltweite ergibt, bei der eine Flammensperre gerade noch sicher ist [5]. Diese Grenzspaltweite ist jedoch nicht gleichzusetzen mit den real auftretenden physikalischen Spaltabständen am Gerät.

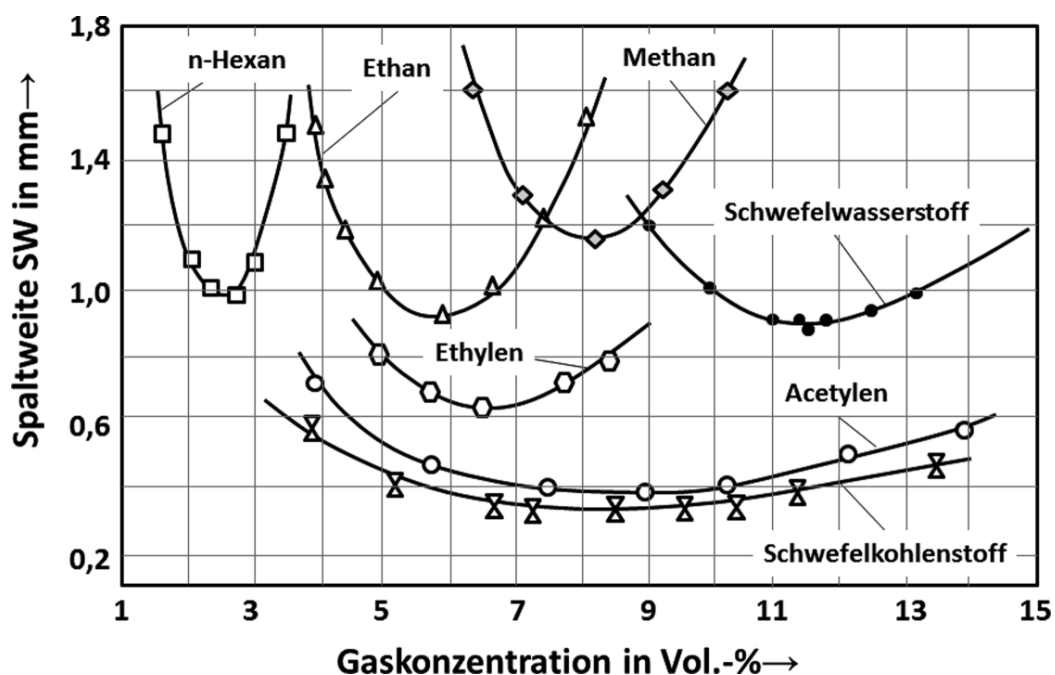


Abb. 1: Spaltweitenkurven verschiedener Brenngase in Abhängigkeit von Volumenanteil [4]

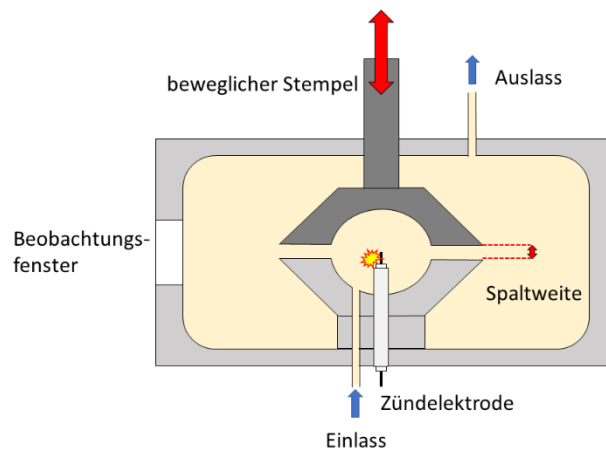


Abb. 2: Gerät zur Bestimmung der Normspaltweite nach ISO/IEC 80079-20-1

Tab. 1: Brennbare Gase und Dämpfe werden entsprechend ihrer MESG in Explosionsgruppen eingeteilt [3]

Explosionsgruppe	
IIA	0,9 mm < MESG
IIB	0,5 mm ≤ MESG ≤ 0,9 mm
IIC	MESG < 0,5 mm

Die Grenzspaltweite sinkt mit steigender Temperatur. Zur Verfügung stehende Datensätze aus der Datenbank CHEMSAFE [6] erlauben für Temperaturen bis 180 °C eine lineare Korrelation. Der Temperaturkoeffizient ist substanzspezifisch. Es ergibt sich eine relative Abnahme zwischen 5 % und 12 % pro 100 K.

Die Druckabhängigkeit der Grenzspaltweiten ist wesentlich ausgeprägter als die Temperaturabhängigkeit [1]. Bei den meisten Stoffen wurden die Grenzspaltweiten (s_G) jedoch nur bei Normaldruck und im Unterdruckbereich jedoch nicht im Überdruckbereich bestimmt. Dabei wurde folgende Abhängigkeit vom Druck (p) gefunden:

$$s_G(p) = s_G(p_0) \cdot p^n \quad (1)$$

Der Exponent n liegt zwischen -0,9 und -1,1. Dies findet sich in guter Übereinstimmung mit den theoretischen Überlegungen, denn der Löscharabstand d_Q ist direkt proportional der Grenzspaltweite:

$$s_G = 0,5 \cdot d_Q \quad (2)$$

Für den Löschabstand (d_Q) gilt nach Brokaw [7]:

$$d_Q \sim p^{-m/2} \quad (3)$$

Wobei m für die Reaktionsordnung steht. Nimmt man eine Reaktion 2. Ordnung an, so ergibt sich für den Exponenten $n \approx -1$. Da die realen Exponenten nur geringe Abweichungen von diesem Wert aufweisen, kann man in guter Näherung von einer umgekehrten Proportionalität der Grenzspaltweite vom Druck ausgehen. Für kurzkettige Alkane liegen auch experimentelle Daten bis 2,8 bar Anfangsdruck vor. Hier deutet sich bereits an, dass die reziproke Druckabhängigkeit im Überdruckbereich die gleiche wie im Unterdruckbereich ist.

Da die Druckabhängigkeit der Grenzspaltweite sehr ausgeprägt ist, hat vermutlich auch der Inertgasanteil im Gemisch einen ausgeprägten Einfluss, da er in direktem Zusammenhang mit dem Sauerstoffpartialdruck steht. Umfangreiche Daten zeigen für Luft mit erhöhten Sauerstoffanteilen, dass es bei der Reduktion des Stickstoffanteils im Vergleich zu Luft zu einer drastischen Absenkung der Spaltweite kommt. Die oben beschriebene Druckabhängigkeit bleibt bei zunehmendem Sauerstoffgehalt erhalten [5].

Bei gleichem Sauerstoffpartialdruck, aber unterschiedlichem Stickstoffgehalt (z.B. 0,5 bar bei 100 % O₂ oder 1 bar bei 50 % O₂) hat das Gemisch ohne Stickstoffanteil jedoch eine kleinere Grenzspaltweite [1]. Dies ist ein Indiz für die zusätzliche inertisierende Wirkung des Stickstoffs, die in diesem Projekt systematisch untersucht werden soll.

Im Vergleich mit einem weiteren Inertgas (CO₂) konnte an Ethylacetat gezeigt werden, dass die Grenzspaltweiten in CO₂ stets höher liegen als in Stickstoff. Weitere Brennstoffe sollten jedoch untersucht werden, um das Ausmaß dieses Effektes für verschiedene Explosionsgruppen bestimmen zu können.

Ziel dieses Projektes ist die Ermittlung der Grenzspaltweite der Prüfgase, die in den Tests der Flammensperren Verwendung finden und somit als Repräsentanten für die Explosionsgruppeneinteilung stehen. Die Grenzspaltweite soll in Abhängigkeit von Inertgasanteil und Druck im Überdruckbereich ermittelt werden. Durch Messungen mit zwei verschiedenen Inertgasen im Bereich bis 2 bar soll abgeklärt werden, ob die bisher bekannten theoretischen Korrelationen zur Abschätzung der Grenzspaltweite validiert werden können und wie groß der erforderliche Sicherheitszuschlag ist.

3 MATERIAL UND METHODEN

3.1 Untersuchte Substanzen und Drücke

Die untersuchten Brenngase in ihren gemessenen Konzentrationen sind als Prüfgase für die Klassifizierung von Flammensperren in DIN EN ISO 16852:2010-09 spezifiziert (Tabelle 2). Die Brenngase in einem festen Mischungsverhältnis mit Luft wurden jeweils mit zwei Inertgasen versetzt (Stickstoff, Kohlendioxid). Für jede Brenngas/Inertgas-Kombination wurden bei verschiedenen Druckstufen (1 bar; 1,5 bar; 2 bar) die Grenzspaltweiten bei variierendem Stoffmengenanteil des Inertgases bis maximal 40 % gemessen.

Tab. 2: Auszug aus der Prüfgastabelle für Deflagrations- und Detonationsprüfungen [8]

Explosionsgruppe	MESG mm	Brenngas	Stoffmengenanteil %	Grenzspaltweite mm
IIA	> 0,9	Propan	4,2 ± 0,2	0,94 ± 0,02
IIB3	≥ 0,65	Ethen	6,6 ± 0,2	0,67 ± 0,02
IIC	< 0,50	Wasserstoff	28,5 ± 2,0	0,31 ± 0,02

3.2 Versuchsaufbau

Die Versuchsdurchführung weicht deutlich von dem Standardverfahren ab, das in ISO/IEC 80079-20-1 beschrieben wird (Abbildung 3). Im Standardverfahren wird das Gerät kontinuierlich unter Umgebungsdruck mit dem Gemisch gespült und die Zufuhr vor dem Versuch gestoppt. Die hier beschriebene modifizierte Versuchsdurchführung ist zeitaufwändiger, da nach jedem Test mit Inertgas gespült wird und im Anschluss die Spaltweitenbombe evakuiert wird. Danach wird das Prüfgemisch mit Hilfe von Massenstromreglern bis zum gewünschten Vordruck eingefüllt und der Temperatenausgleich abgewartet. Diese Prozedur dient zum einen der kontrollierten Einstellung eines erhöhten Vordrucks und zum anderen der Entfernung von unverbranntem oder verbranntem Gemisch und Wasser aus dem Gerät. Die aufwändige Prozedur schränkt jedoch die Anzahl der Versuche im Vergleich mit der Standardprozedur ein.

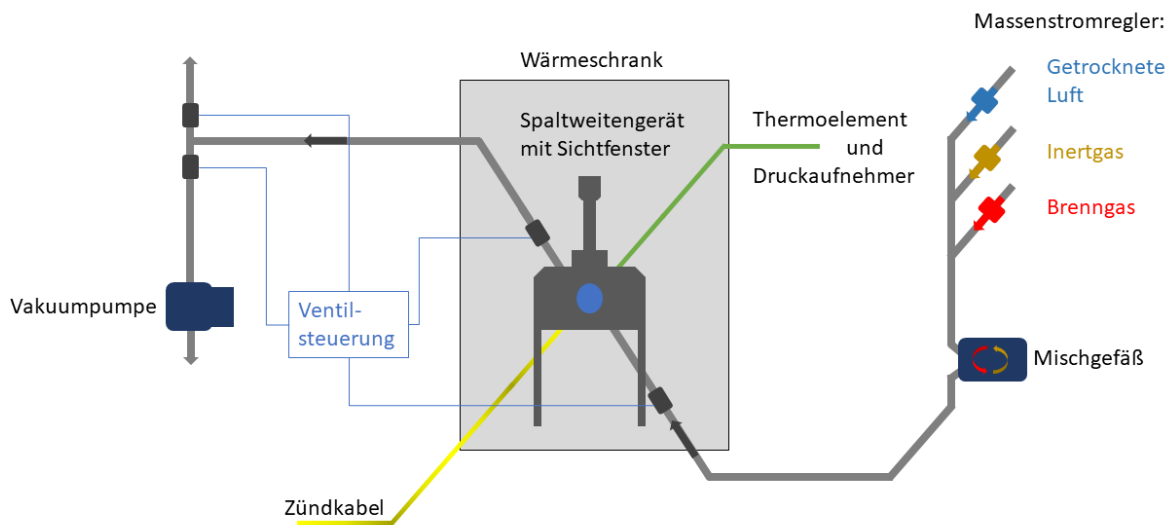


Abb. 3: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus für Brennstoff/Inertgas/Luft-Gemische (der hier gezeigte Wärmeschrank fand für die Versuche keine Anwendung).

3.3 Versuchsdurchführung

Vor Beginn der Versuchsreihen wurde der Spaltabstand der Stempel mit Hilfe von Parallelendmaßen kalibriert. Die Planparallelität des Spaltes wich um nicht mehr als 0,01 mm an verschiedenen Positionen ab.

Vor jedem Zündversuch wurde das Spaltweitengerät auf unter 15 mbar evakuiert, um anhaftende Feuchtigkeit und Abgase aus dem Vorversuch zu entfernen. Im Anschluss wurde das Einlassventil geöffnet und so das Gefäß mit dem gewünschten Gemisch bis zu dem gewünschten Vordruck aufgefüllt. Zur Herstellung des Gemisches wurde getrocknete Luft mit einem Feuchtegehalt von $< 2\%$ verwendet. Nach einer Wartezeit von 2 Min, die dem Temperatenausgleich dient, wurde der Zündversuch durchgeführt. Unabhängig davon, ob es zum Flammendurchschlag kam oder nicht, wurde anschließend das Gerät fünffach mit Inertgas gespült. Erst danach begann der nächste Versuchszyklus. Die Versuchsreihe begann mit einer geringen Spaltöffnung und wurde im Falle des Nicht-Durchschlags mit größerem Spalt in Schritten von 0,02 mm wiederholt. Wenn es zum Durchschlag kam, wurde der Spalt wieder verringert und mindestens zehn Nichtzündungen im Abstand einer Schrittweite unterhalb der höchsten Zündung gemessen.

3.4 Unsicherheit

Das Gerät wurde vor Beginn der Testreihe mit Methan, Propan und Wasserstoff verifiziert. Gemäß ISO/IEC 80079-20-1 liegt der Toleranzbereich der Verifizierung bei

$\pm 0,02$ mm. Der Toleranzbereich entspricht der erweiterten Messunsicherheit der Einzelmessung.

4 ERGEBNISSE

In den folgenden Graphen sind die gemessenen Spaltweiten oder Grenzspaltweiten (s_G) dargestellt, also die Werte der größten Spaltweiten, bei denen es gerade nicht zum Durchschlag kommt. Der niedrigste Wert eines Durchschlags lag $0,02$ mm darüber.

4.1 Konzentrationsabhängigkeit

Zunächst wurde am Beispiel des Ethens der Verlauf der durchschlagsicheren Spaltweite bei erhöhtem Stickstoffanteil bestimmt. Es zeigte sich, dass bei Zugabe des Inertgases die Spaltweite zwar ansteigt und gleichzeitig die Flanken steiler werden, dass aber das Minimum sich nicht verschiebt (Abbildung 4). Deshalb wurden in allen folgenden Versuchen die Brenngaskonzentrationen im Verhältnis zu Luft konstant gehalten. Es wurde das Konzentrationsverhältnis am Minimum der Kurve bei 1 bar ohne Zusatz von Inertgas gewählt (also der MESG zugehörig). Wenn ein Anteil an zusätzlichem Inertgas angegeben ist, bezieht er sich auf das Mischungsverhältnis mit dem Brenngas/Luft-Gemisch.

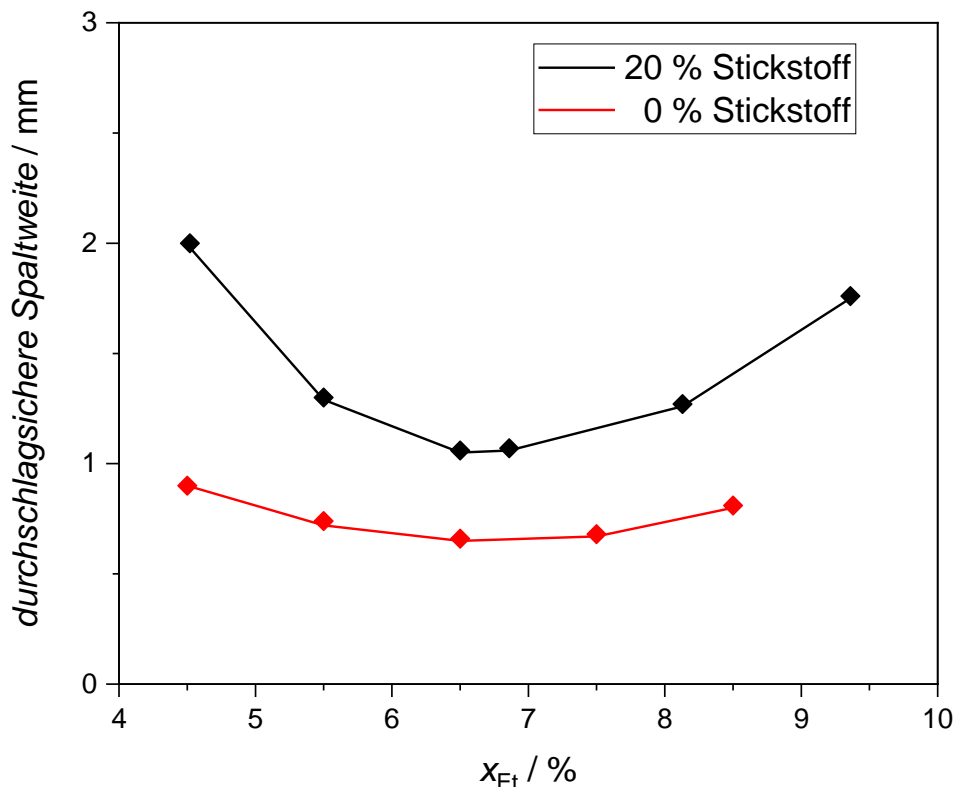


Abb. 4: Abhängigkeit der durchschlagsicheren Spaltweite vom Stoffmengenanteil Ethen (x_{Et}) in der Mischung mit Luft bei einem Druck von 1 bar

4.2 Druckabhängigkeit bei Zusatz von Inertgasen

Die Ergebnisse der Testreihen sind in den folgenden Abbildungen 5, 7 und 9 wiedergegeben. Für jedes der drei Brenngase (Ethen, Propan, Wasserstoff) wurde auf drei Stufen des Ausgangsdruckes (1 bar; 1,5 bar und 2 bar) der Anteil von Inertgas (Stickstoff oder Kohlendioxid) variiert. Die Grenzspaltweiten der reinen Brenngas/Luft-Gemische ohne Zugabe von Inertgas wurden der Literatur entnommen (Tabelle 3).

Anhand der Abbildungen ist zu sehen, dass die Grenzspaltweite in Kohlendioxid stets höher liegt als in Luft. Die Rangfolge bleibt auch bei erhöhten Druckstufen erhalten. Des Weiteren steigen die Grenzspaltweiten mit zunehmendem Gehalt an Inertgas im Gemisch exponentiell an.

Aufgrund der in Einleitung beschriebenen, bereits bekannten Druckabhängigkeit der Grenzspaltweite in Luft [4], wurde das Ergebnis für jede Zusammensetzung des Gemisches ebenfalls in Abhängigkeit des reziproken Druckwertes dargestellt (Abbildungen 6, 8, und 10). Die sich ergebende Gerade zeigt, dass diese Beziehung ebenfalls für die untersuchten Inertgase gültig ist.

Tab.3: Literaturwerte für die Grenzspaltweiten (s_G) der verschiedenen Brenngase bei erhöhtem Druck und 20 °C [3, 4, 5] ohne Zugabe von Inertgas

	s_G [mm]		
	1 bar	1,5 bar	2 bar
Wasserstoff	0,29	0,21	0,19
Ethen	0,65	0,49	0,39
Propan	0,92	0,66	0,53

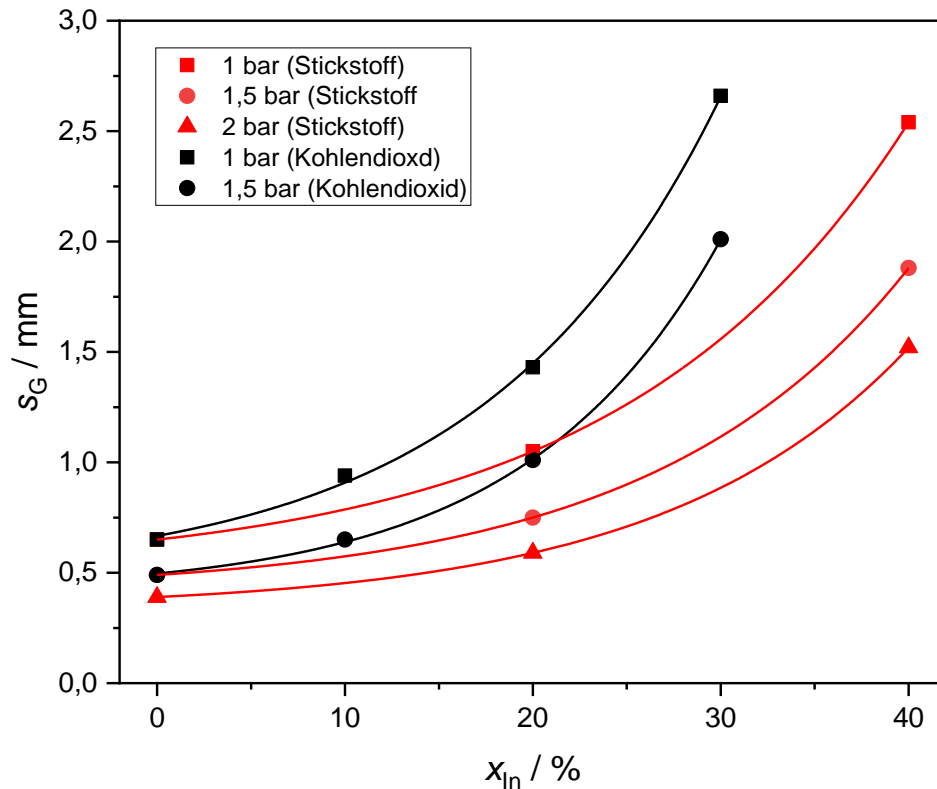


Abb. 5: Verlauf der Grenzspaltweite einer Mischung von 6,5 % Stoffmengenanteil Ethen mit Luft und verschiedenen Inertgasen in Abhängigkeit vom zugegebenen Inertgasanteil bei verschiedenen Drücken

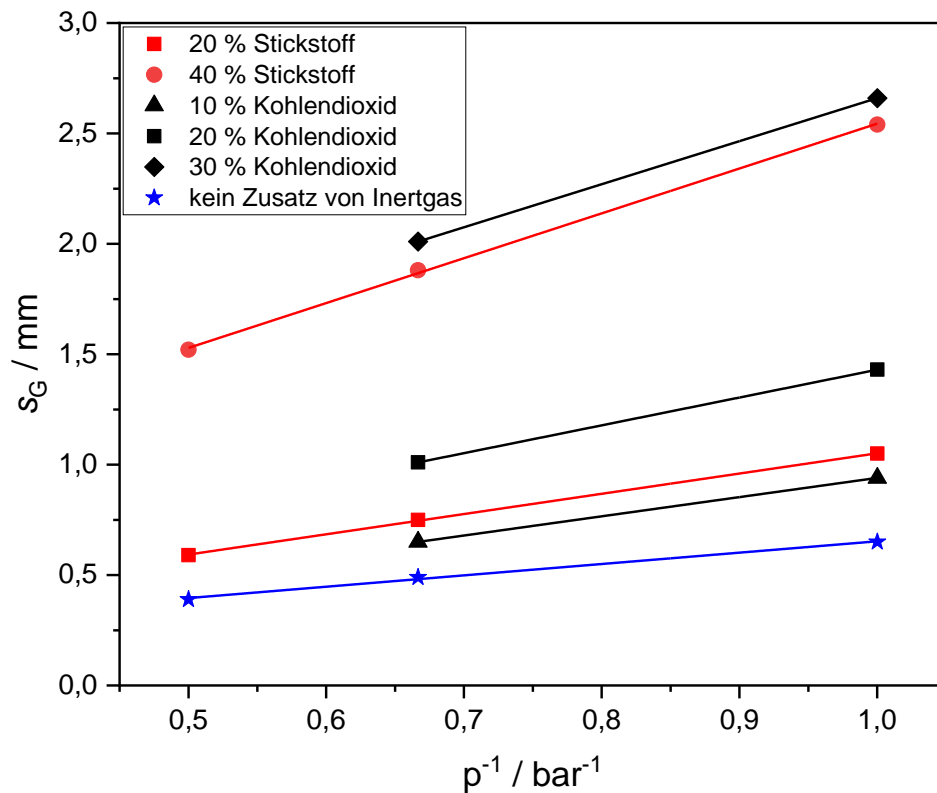


Abb. 6: Reziproke Druckabhängigkeit der Grenzspaltweite einer Mischung von 6,5 % Stoffmengenanteil Ethen mit Luft und verschiedenen Inertgasen in unterschiedlichen Anteilen

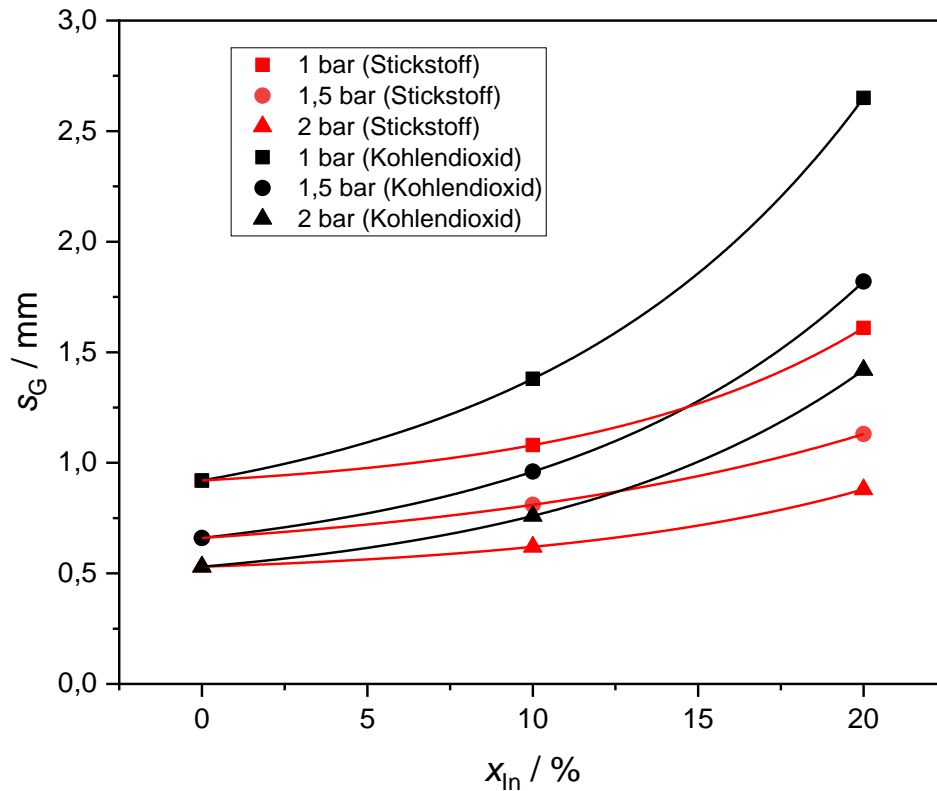


Abb. 4: Verlauf der Grenzspaltweite einer Mischung von 4,4 % Stoffmengenanteil Propan mit Luft und verschiedenen Inertgasen in Abhängigkeit vom zugegebenen Inertgasanteil bei verschiedenen Drücken

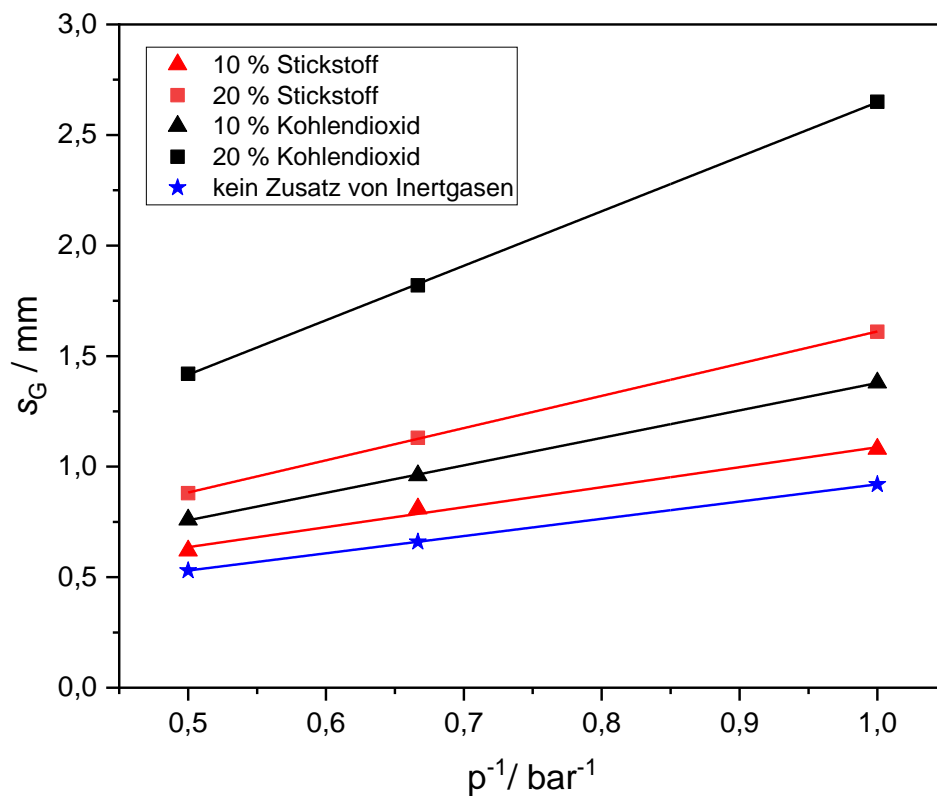


Abb. 8: Reziproke Druckabhängigkeit der Grenzspaltweite einer Mischung von 4,4 % Stoffmengenanteil Propan mit Luft und verschiedenen Inertgasen in unterschiedlichen Anteilen

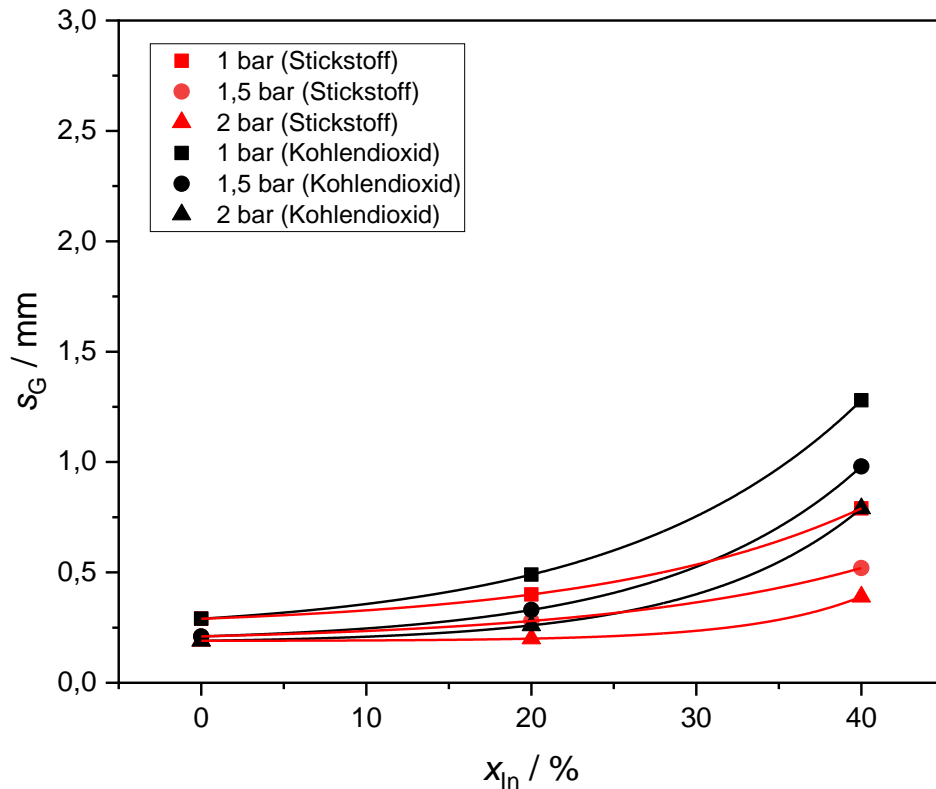


Abb. 9: Verlauf der Grenzspaltweite einer Mischung von 29,5 % Stoffmengenanteil Wasserstoff mit Luft und verschiedenen Inertgasen in Abhängigkeit vom zugegebenen Inertgasanteil bei verschiedenen Drücken

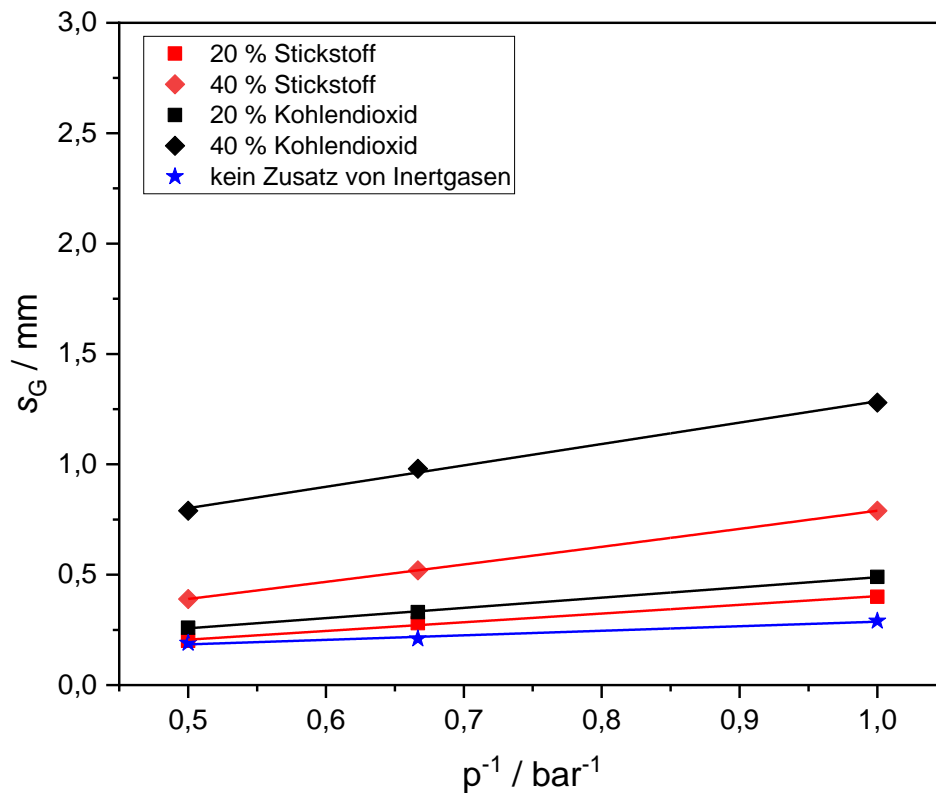


Abb. 10: Reziproke Druckabhängigkeit der Grenzspaltweite einer Mischung von 29,5 % Stoffmengenanteil Wasserstoff mit Luft und verschiedenen Inertgasen in unterschiedlichen Anteilen

5 DISKUSSION

Die Ergebnisse zeigen, dass die Grenzspaltweite mit zunehmendem Anteil an Inertgas exponentiell ansteigt. Dies ist hauptsächlich auf die Verdünnung des explosionsfähigen Gemisches zurückzuführen, die bei der Verbrennung zu einer geringeren Energiefreisetzung pro Volumeneinheit des Gases führt und die Flammengeschwindigkeit herabsetzt. Da es im Spalt zur Energiedissipation kommt, erlischt die Flammenfront eines verdünnten Reaktionsgases in engeren Spalten eher als in weiteren. Die Ergebnisse zeigen jedoch auch, dass die Grenzspaltweite nicht allein vom Partialdruck des Sauerstoffs oder Brenngases im Gasgemisch abhängt. Die Art des Inertgases ist ebenfalls für die Durchschlagsfähigkeit einer Brenngasmischung von Bedeutung.

Bei Zugabe von Stickstoff zu dem Wasserstoff enthaltenden Prüfgemisch ändert sich die Wärmekapazität des Gemisches so gut wie nicht. Bei den Ethen/Luft- und Propan/Luft-Gemischen verringert sie sich bei der Zugabe von Stickstoff leicht. Trotzdem steigt die Grenzspaltweite mit zunehmendem Stickstoffgehalt exponentiell an, da das brennbare Gemisch verdünnt wird.

Kohlendioxid hat gegenüber Stickstoff eine erhöhte Inertisierungswirkung. Dieser Effekt ist bereits durch eine stärkere Einengung der Explosionsbereiche brennbarer Gase und Dämpfe bekannt [9]. Er wird bei der Inertisierung zur Vermeidung des Auftretens brennbarer Flüssigkeiten industriell genutzt [10]. ISO 10156 [11] gibt für Kohlendioxid einen Stickstoffäquivalenzkoeffizienten von 1,5 an. Dieser beruht sowohl auf einer gegenüber Stickstoff höheren molaren Wärmekapazität (c_p) als auch auf der Fähigkeit eines dreiatomigen Moleküls, Wärmestrahlung zu absorbieren. Bei Zugabe von Kohlendioxid zu den Prüfgemischen steigt die molare Wärmekapazität für alle unverbrannten Prüfgasgemische an, so dass dieser Effekt den Verdünnungseffekt verstärkt.

Ein Vergleich der kürzlich von *Razus et al.* [12] veröffentlichten Messungen an Ethylen-Gemischen unter Zusatz von Inertgasen zeigt deutliche Abweichungen zwischen den Messwerten. Die in unserem Bericht präsentierten Grenzspaltweiten sind durchweg kleiner (zur sicheren Seite) und mit den in ISO/IEC 80079-20-1 [3] und DIN EN ISO 16852 [8] genannten Vergleichswerten konsistent. Es kann also davon ausgegangen werden, dass die Bedingungen zur Herstellung eines Minimalwertes der durchschlagsicheren Spaltweite über die Konzentration eingehalten wurden. Da die in der Norm geforderte Vergleichbarkeit der Ergebnisse von 0,04 mm zwischen einzelnen Prüflabors noch nicht gegeben ist, sollte ein Vergleichsversuch durchgeführt werden.

6 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

In diesem Projekt wurde in hunderten von Einzelmessungen der Einfluss von Inertgasen auf die Grenzspaltweite verschiedener Prüfgase im Überdruckbereich untersucht. Die Grenzspaltweite fällt mit zunehmendem Druck umgekehrt proportional ab, kann aber durch Zusatz von Inertgas exponentiell wieder angehoben werden. Kohlendioxid zeigt dabei eine stärkere inertisierende Wirkung als Stickstoff.

In Fortsetzung dieser Arbeit könnte die Frage geklärt werden, ob die hier gewonnenen Ergebnisse zum Beispiel auf reale Flammensperren übertragbar sind. In Tests an einer Flammensperre kann der Inertgasanteil eines Prüfgemisches ermittelt werden, bei dem die Sperre gerade noch nicht durchschlägt. Von diesem Prüfgas wird dann die Grenzspaltweite in der Normapparatur bestimmt. Nun können weitere Inertgas/Druck-Kombinationen gewählt werden, die die gleiche Grenzspaltweite aufweisen und mit ihnen geprüft werden, ob die Flammensperre damit das gleiche Durchschlagsverhalten aufweist. Sollte dies der Fall sein, wäre es möglich mit Hilfe von Grenzspaltweitenbestimmungen im Labor Vorhersagen über das Verhalten der Flammensperren in Verbindung mit erhöhten Inertgasanteilen zu treffen.

7 LITERATURVERZEICHNIS

- [1] W. Hirsch, E. Brandes: Sicherheitstechnische Kenngrößen von Gasen und Dämpfen bei nicht atmosphärischen Bedingungen; Tech.Sich. 5 (2015), Nr.6, 29-38
- [2] RICHTLINIE 2014/34/EU DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 26. Februar 2014 zur Harmonisierung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten für Geräte und Schutzsysteme zur bestimmungsgemäßen Verwendung in explosionsgefährdeten Bereichen (Neufassung), Amtsblatt der Europäischen Union, L96/309
- [3] ISO/IEC 80079-20-1:2017-12, Explosionsfähige Atmosphären - Teil 20-1: Stoffliche Eigenschaften zur Klassifizierung von Gasen und Dämpfen - Prüfverfahren und Daten, Beuth Verlag
- [4] T. Redeker: Classification of flammable gases and vapours by the flameproof safe gap and the incendivity of electrical sparks; PTB-W-18 (1981), ISSN 0341-6739
- [5] S. Henkel, S. Zakel, F. Stolpe: Determination of the performance limits of flame arresters at increased oxygen concentrations, Journal of Loss Prevention in the Process Industries; 58 (2019), 17 – 21
- [6] Datenbank Chemsafe, www.chemsafe.ptb.de, Zugriffsdatum: 13.7.2020
- [7] R. S. Brokaw, M. Gerstein: Correlations of burning velocity, quenching distances and minimum ignition energies of hydrocarbon-oxygen-nitrogen systems; Proc. 6th Symp. Int. on Comb., New Haven (1956), 66
- [8] DIN EN ISO 16852:2017-04, Flammendurchschlagsicherungen - Leistungsanforderungen, Prüfverfahren und Einsatzgrenzen (ISO 16852:2016); Deutsche Fassung EN ISO 16852:2016, Beuth Verlag

- [9] B. Lewis, G. von Elbe: Combustion, flames and explosions of gases; Academic press inc., Orlando, Florida (1987)
- [10] TRGS 722: Vermeidung oder Einschränkung gefährlicher explosionsfähiger Atmosphäre, Technische Regel für Gefahrstoffe, Ausgabe: März 2012, GMBI 2012 S. 398 [Nr. 22]
- [11] ISO 10156:2017-07, Gasflaschen - Gase und Gasgemische - Bestimmung der Brennbarkeit und des Oxidationsvermögens zur Auswahl von Ventilausgängen, Beuth Verlag
- [12] D. Razus, M. Mitu, V. Giurcan, C. Movileanu, D. Oancea: Additive influence on maximum experimental safe gap of ethylene-air mixtures; Fuel, 237 (2019), 888-894