



Themenschwerpunkt
Physikalisch-Chemische
Sicherheitstechnik
und Explosionsschutz

Fachorgan für Wirtschaft und Wissenschaft

Amts- und Mitteilungsblatt der
Physikalisch-Technischen Bundesanstalt
Braunschweig und Berlin

121. Jahrgang, Heft 1, März 2011

Inhalt

Themenschwerpunkt	Physikalisch-Chemische Sicherheitstechnik und Explosionsschutz	
	<ul style="list-style-type: none">• <i>Michael Beyer, Heino Bothe und Thomas Schendler</i>: Physikalisch-Chemische Sicherheitstechnik und Explosionsschutz in PTB und BAM 3• <i>Ulrich Johannsmeyer, Uwe Klausmeyer</i>: Herausforderungen an Dienstleistungen im Explosionsschutz 8• <i>Wolfgang Möller, Alexander Seifert</i>: CHEMSAFE 2011 13• <i>Elisabeth Brandes, Joachim Milde und Volkmar Schröder</i>: Schwer entzündbare Gase und Dämpfe – Erweiterung der europäischen Norm EN 1839 16• <i>Hans Förster</i>: Messung und Festlegung explosionsgefährdeter Bereiche – Erfahrungen aus praxisnahen Untersuchungen an Tankfahrzeugen für brennbare Flüssigkeiten 21• <i>Volkmar Lohse, Detlef Negendank, Martin Thedens</i>: Gaswarnsysteme für den Explosionsschutz – Anforderungen an Explosionsschutz, Messfunktion und funktionale Sicherheit 30• <i>Detlef Markus, Tim Langer, Udo Gerlach, Frank Lienesch</i>: Zündung durch elektrische Entladungen 34• <i>Felix Welzel, Thomas Grunewald, Michael Beyer, Rainer Grätz</i>: Mechanisch erzeugte Reib- und Schlagfunken im Vergleich 41• <i>Thomas Horn</i>: Zündgefahrenbewertung von PEM-Brennstoffzellen hinsichtlich innerer explosionsartiger Verbrennungsreaktionen 47• <i>Marco Poli, Swen Scheider, Detlef Arndt, Rainer Grätz, Volkmar Schröder</i>: Auswirkungen von Turbulenzen auf die Druckentlastung von Gasexplosionen 51• <i>Elisabeth Brandes, Hartmut Hieronymus</i>: Sicherheit bei mikrostrukturierten Reaktoren 55	
	Amtliche Bekanntmachungen (eigenes Inhaltsverzeichnis)	59

Zum Titelbild:

Stellvertretend für die Zündquellen, die in explosionsgefährdeten Bereichen stets zu vermeidenden sind, zeigt das große Bild eine Gleitstielbüschelentladung, die durch hohe elektrostatische Aufladung dünner isolierender Schichten entsteht. Die Eignung von Geräten und Schutzsystemen für den Einsatz in explosionsgefährdeten Bereichen, wie z. B. Elektromotoren (links unten) und Druckentlastungseinrichtungen (links Mitte), ist oft nur experimentell nachzuweisen. Dazu werden in PTB und BAM Einrichtungen von der kleinen Vakuumversuchsanlage (PTB, links oben) bis zum großen Siloversuchsstand (BAM, links Mitte) vorgehalten.

Impressum

Die **PTB-Mitteilungen** sind metrologisches Fachjournal und amtliches Mitteilungsblatt der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt, Braunschweig und Berlin. Als Fachjournal veröffentlichen die PTB-Mitteilungen wissenschaftliche Fachaufsätze zu metrologischen Themen aus den Arbeitsgebieten der PTB. Als amtliches Mitteilungsblatt steht die Zeitschrift in einer langen Tradition, die bis zu den Anfängen der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt (gegründet 1887) zurückreicht. Die PTB-Mitteilungen veröffentlichen in ihrer Rubrik „Amtliche Bekanntmachungen“ unter anderem die aktuellen Geräteprüfungen und -Zulassungen aus den Gebieten des Eich-, Prüfstellen- und Gesundheitswesens, des Strahlenschutzes und der Sicherheitstechnik.

Verlag

Wirtschaftsverlag NW
Verlag für neue Wissenschaft GmbH
Bürgermeister-Smidt-Str. 74–76,
27568 Bremerhaven
Postfach 10 11 10, 27511 Bremerhaven
Internet: www.nw-verlag.de
E-Mail: info@nw-verlag.de

Herausgeber

Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB),
Braunschweig und Berlin
Postanschrift:
Postfach 33 45, 38023 Braunschweig
Lieferanschrift:
Bundesallee 100, 38116 Braunschweig

Redaktion/Layout

Presse- und Öffentlichkeitsarbeit, PTB
Dr. Dr. Jens Simon (verantwortlich)
Dr.-Ing. Michael Beyer (wissenschaftliche
Redaktion)
Gisela Link
Telefon: (05 31) 592-82 02
Telefax: (05 31) 592-30 08
E-Mail: gisela.link@ptb.de

Leser- und Abonnement-Service

Marina Kornahrens
Telefon: (04 71) 9 45 44-61
Telefax: (04 71) 9 45 44-88
E-Mail: vertrieb@nw-verlag.de

Anzeigenservice

Karin Drewes
Telefon: (04 71) 9 45 44-21
Telefax: (04 71) 9 45 44-77
E-Mail: info@nw-verlag.de

Erscheinungsweise und Bezugspreise

Die PTB-Mitteilungen erscheinen viermal jährlich. Das Jahresabonnement kostet 55,00 Euro, das Einzelheft 16 Euro, jeweils zzgl. Versandkosten. Bezug über den Buchhandel oder den Verlag. Abbestellungen müssen spätestens drei Monate vor Ende eines Kalenderjahres schriftlich beim Verlag erfolgen.

© Wirtschaftsverlag NW, Verlag für neue Wissenschaft GmbH, Bremerhaven, 2011

Alle Rechte vorbehalten. Kein Teil dieser Zeitschrift darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages vervielfältigt oder verbreitet werden. Unter dieses Verbot fällt insbesondere die gewerbliche Vervielfältigung per Kopie, die Aufnahme in elektronische Datenbanken und die Vervielfältigung auf CD-ROM und in allen anderen elektronischen Datenträgern.

Physikalisch-Chemische Sicherheitstechnik und Explosionsschutz in PTB und BAM

Michael Beyer¹, Heino Bothe² und Thomas Schendler³

1 BAM und PTB – gemeinsam für die Physikalisch- Chemische Sicherheitstechnik

Unter diesem Motto arbeiten die BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung und die PTB abgestimmt, aber mit eigenen Schwerpunkten, eng auf dem Gebiet des Brand- und Explosionsschutzes zusammen. Das Ziel dieser Zusammenarbeit ist die Gewährleistung sicherer Prozesse und Technik in einem sich ständig verändernden technischen und industriellen Umfeld. Das vorliegende Themenheft der PTB-Mitteilungen zeigt einen Ausschnitt aus dem gemeinsamen Aufgabengebiet mit dem Schwerpunkt des klassischen Explosionsschutzes.

Ein augenfälliges Beispiel für diese Zusammenarbeit sind die seit 30 Jahren gemeinsam veranstalteten Kolloquien zu Fragen der chemischen und physikalischen Sicherheitstechnik. Auch beim 12. Kolloquium dieser Reihe präsentierten beide Bundesanstalten wieder ihre aktuellen Entwicklungen und Forschungsergebnisse (Bild 1). Teilnehmer aus wissenschaftlichen und sicherheitstechnischen Institutionen, aus Behörden, aber auch Hersteller explosionsgeschützter Geräte und sicherheitsrelevanter Ausrüstung sowie Betreiber von Anlagen mit Explosionsgefährdungen nutzten diese Gelegenheit, sich über den Stand von Wissenschaft und Sicherheitstechnik zu informieren und mit den Mitarbeitern von BAM und PTB sicherheitstechnische Praxisfragen zu diskutieren. In zwei Tagen intensiver wissenschaftlicher und sicherheitstechnischer Diskussion wurde die große Bandbreite und die damit verbundene technisch-wissenschaftliche Expertise von BAM und PTB auf dem Gebiet der physikalisch-chemischen Sicherheitstechnik deutlich.



Bild 1:
Seit 1981 veranstalten BAM und PTB gemeinsame Kolloquien zu Fragen der chemischen und physikalischen Sicherheitstechnik

2 Aufgabenteilung zwischen PTB und BAM

Die Physikalisch-Chemische Sicherheitstechnik im Aufgabenbereich von PTB und BAM umfasst im Wesentlichen die Untersuchung und Bewertung von

- gefährlichen Stoffen und Gütern,
- gefährlichen chemischen Reaktionen,
- Verfahren, Anlagen, Anlagenteilen und Sicherheitseinrichtungen für den Umgang mit gefährlichen Stoffen und Stoffsystemen.

Der Explosionsschutz als Teilgebiet der Physikalisch-Chemischen Sicherheitstechnik ist zu verstehen als Summe der Schutzmaßnahmen bei ungewollten Oxidationsreaktionen in der Gasphase unter atmosphärischen Bedingungen mit nachfolgendem Anstieg von Temperatur und Druck in geschlossenen Systemen auch au-

¹ Dr.-Ing. Michael Beyer,
Leiter des PTB-Fach-
bereichs „Zündquellen-
sicherheit“,
michael.beyer@ptb.de

² Dr. Heino Bothe, Leiter
des PTB-Fachbereichs
„Grundlagen des
Explosionsschutzes“,
heino.bothe@ptb.de

³ Dr. Thomas Schendler,
Leiter der BAM-
Abteilung „Chemische
Sicherheit“,
thomas.schendler@
bam.de

ßerhalb atmosphärischer Bedingungen. Dieses Gebiet erstreckt sich daher von den stofflichen Eigenschaften über die Gemischausbreitung, die Zündquellenbeherrschung und Begrenzung der Explosionsauswirkungen, die Beschaffenheitsanforderungen an Geräte, Schutzsysteme und Anlagen bis hin zu den Betriebsvorschriften der Anlagensicherheit und des Transports gefährlicher Güter.

In der PTB werden ausschließlich Fragen des Explosionsschutzes bearbeitet. Dazu gehören die oben genannten apparativen Fragestellungen mit dem Schwerpunkt der Vermeidung von elektrischen und mechanischen Zündquellen sowie Fragen zum Umgang mit brennbaren Flüssigkeiten. In der BAM hingegen ist die Physikalisch-Chemische Sicherheitstechnik als Ganzes Schwerpunktaufgabe. Dazu gehören neben den in diesem Heft behandelten Themen generell die Ermittlung und Bewertung gefährlicher Stoffeigenschaften sowie die Sicherheit z. B. von Druckbehältern und Lageranlagen und Festlegungen für den Transport gefährlicher Güter. Im engeren Bereich des Explosionsschutzes ist die BAM stofflich für den Umgang mit brennbaren Gasen und Stäuben zuständig, befasst sich aber – anders als die PTB – nicht mit Fragen des elektrischen Explosionsschutzes.

Die beschriebene Aufgabenteilung für Standardaufgaben besteht im Wesentlichen schon seit Jahrzehnten und hat sich gut bewährt. Im Falle neuer oder komplexer, übergreifender Fragestellungen werden die Aufgaben gemeinsam in enger Absprache geklärt. Darüber hinaus gibt es seit 2005 ein gemeinsames Lenkungsgremium für den Bereich der Physikalisch-Chemischen Sicherheitstechnik, in dem mittel- bis langfristige fachliche und strukturelle Planungen, große In-

vestitionen und Maßnahmen zur gemeinsamen Außendarstellung des Fachgebietes abgestimmt werden. Ziel ist eine gemeinsame effiziente und effektive Bearbeitung der Kernaufgaben Politikberatung, Industrierberatung (Gutachten, Normung etc.), Förderung der Wirtschaft durch wissenschaftsbasierte Dienstleistungen (Prüfung und Zulassung) und Erarbeitung wissenschaftlicher Erkenntnisse im vorhandenen Netzwerk der Sicherheitsforschung. Der nachfolgende Beitrag dieses Heftes „Herausforderungen an Dienstleistungen im Explosionsschutz“ beleuchtet, dass nicht nur in der Forschung erhebliche Neuerungen auf das Fachgebiet einwirken.

3 Politikberatung und Wissenstransfer in die Industrie

Als Ressortforschungseinrichtungen der Bundesregierung kommen BAM und PTB spezifische Aufgabenstellungen zu, damit sie ihrer Scharnierfunktion zwischen den Interessen der Wirtschaft und der Gesellschaft gerecht werden können. Ein wesentlicher Bestandteil dieser Funktion ist die Beratung der Bundesregierung in den sicherheitstechnischen Gremien verschiedener Bundesministerien, die sich u. a. mit dem Anpassungsbedarf des Regelwerkes nach großen Explosionsunfällen befassen (Bild 2). Dazu gehören u. a. der Ausschuss für Betriebssicherheit (ABS) und der Ausschuss für Gefahrstoffe (AGS) des Bundesministeriums für Arbeit und Soziales (BMAS), der Ausschuss Gefahrgutbeförderung (AGGB) und der Gefahrgut-Verkehrs-Beirat beim Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) sowie die Kommission für Anlagensicherheit (KAS) des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) mit diversen Untergremien. Vertreter von BAM und PTB arbeiten weiterhin in den regelsetzenden Gremien der Berufsgenossenschaften mit und beraten darüber hinaus auch die Gewerbe- und Marktaufsicht der Bundesländer sowie andere Behörden, aber auch die Industrie (u. a. Hersteller explosionsgeschützter Geräte und Betreiber überwachungsbedürftiger Anlagen).

Wie in vielen anderen Branchen nimmt auch im Explosionsschutz die Bedeutung des internationalen Marktes immer mehr zu. Insbesondere die deutschen Unternehmen sind sehr stark vom globalen Handel mit technischen Produkten und Ingenieurdienstleistungen abhängig. Für die Industrie (Hersteller wie auch Betreiber von überwachungsbedürftigen Anlagen) spielt daher die europäische und internationale Normung eine immer größere Rolle. Wesentlich sind dabei die harmonisierten europäischen Normen, die die Vermutung der Erfüllung bezüglich europäischer Richtlinien auslösen, hier insbesondere die Normen von CENELEC/TC 31 „Elektrische Betriebsmittel für explosionsgefährdete Bereiche“



Bild 2:
Im Dezember 2005 kam es im englischen Tanklager Buncefield nach Freisetzung einer großen Ottokraftstoffdampf-Wolke zu mehreren Explosionen und einem verheerenden Folgebrand (Quelle: www.buncefieldinvestigation.gov.uk).

und CEN/TC 305 „Explosionsfähige Atmosphären – Explosionsschutz“ mit der Vermutungswirkung in Bezug auf die Richtlinie 94/9/EG. Die Normen des elektrischen Explosionsschutzes werden inzwischen nahezu ausschließlich auf IEC-Ebene erarbeitet (im IEC/TC 31 „Equipment for explosive atmospheres“) und dann als harmonisierte europäische Normen übernommen. Bei den Normen des CEN/TC 305 für nichtelektrische Geräte, Schutzsysteme und sicherheitstechnische Kenngrößen, die bisher ausschließlich auf europäischer Ebene entwickelt wurden, beginnt dieser Prozess gerade im IEC/SC 31M „Non-electrical equipment and protective systems for explosive atmospheres“, das ISO-Normen auf diesem Gebiet erarbeitet.

Mitarbeiter der vier PTB-Fachbereiche des Explosionsschutzes und der Abteilung „Chemische Sicherheitstechnik“ der BAM arbeiten auf allen Ebenen dieses Normungsprozesses in fachlichen und leitenden Funktionen mit. Sie vertreten dabei sicherheitstechnische und technologische Grundsätze, wie sie in Deutschland und Europa über Jahre entwickelt wurden und unterstützen damit auch die vielen KMU, die sich selber nicht an der internationalen Normung beteiligen können. Für den außergewöhnlichen Einsatz in diesem Normungssektor ist Dr. Uwe Klausmeyer 2009 mit dem Lord Kelvin Award der Internationalen Elektrotechnischen Kommission (IEC) ausgezeichnet worden.

Forschungs- und Entwicklungsarbeiten in PTB und BAM zu den Eigenschaften explosionsfähiger Atmosphären, über elektrische und nichtelektrische Zündquellen sowie zum Ablauf von Explosions- und Detonationsvorgängen unterstützen als pränormative Forschung die Normungs- oder Regelwerksarbeiten oder bilden Grundlagen für technische Entwicklungen.

4 Grundzüge des Explosionsschutzes

Die Grundzüge des Explosionsschutzes, die im Folgenden skizziert werden, bilden sich auch in der Arbeitstruktur von BAM und PTB ab. Nähere Erläuterungen zu den Arbeiten beider Bundesanstalten geben dann die weiteren Fachbeiträge dieses Heftes.

Die sicherheitstechnische Beurteilung von Explosionsgefährdungen ist von entscheidender Bedeutung für viele technische Prozesse. Die Maßnahmen des Explosionsschutzes gliedern sich klassisch in drei verschiedene Teilgebiete (Bild 3). Zunächst wird die Vermeidung explosionsfähiger Atmosphären betrachtet. Gelingt dies sicher, z. B. durch Verwendung nichtbrennbarer Ersatzstoffe oder Prozessführung außerhalb der Explosionsgrenzen, sind keine weiteren Explosionsschutzmaßnahmen mehr nötig. Kann aber explosionsfähige Atmosphäre nicht sicher vermieden werden, steht die Beherrschung von



Bild 3:
Die Maßnahmen des Explosionsschutzes werden in drei Teilaspekte gegliedert: Das Vermeiden explosionsfähiger Atmosphäre, das Vermeiden von Zündquellen und das Begrenzen der Auswirkungen von Explosionen auf ein unbedenkliches Maß

Zündquellen im Vordergrund. Für den Fall, dass Prozesse nicht vollständig zündquellenfrei betrieben werden können oder das Versagen von technischen Schutzmaßnahmen nicht ausgeschlossen werden kann, müssen dann im nächsten Schritt die Auswirkungen von Explosionen auf ein unbedenkliches Maß begrenzt werden.

4.1 Basisinformationen für die Beurteilung von Explosionsgefahren

Eine wichtige Basis für die Beurteilung von Explosionsgefahren sind die sicherheitstechnischen Kenngrößen von brennbaren Gasen, Dämpfen und Stäuben. Diese Kenngrößen erlauben die Beurteilung, ob explosionsfähige Atmosphäre vorliegt (z. B. an Hand der Kenngrößen Explosionsgrenzen, Sauerstoffgrenzkonzentration, Explosionspunkt, Flammpunkt), ob die brennbaren Stoffe sich entzünden können (z. B. an Hand der Zündtemperatur und Mindestzündenergie), aber auch eine Aussage über Ausbreitung und Auswirkung einer Explosion (Normspaltweite, Explosionsdruck und Explosionsdruckanstiegsgeschwindigkeit). In der gemeinsam von BAM, PTB und DECHEMA betriebenen Datenbank CHEMSAFE werden die Kenngrößen erfasst und auf einfache Art für Anwender verfügbar gemacht. Ein wesentliches Merkmal von CHEMSAFE ist dabei, dass vor der Aufnahme der Stoffe in die Datenbank ein Bewertungsprozess durchgeführt wird, der für eine besondere Verlässlichkeit der abrufbaren Daten sorgt. Dies ist Grund genug, die Erfolgsgeschichte in dem Beitrag „CHEMSAFE 2011“ etwas näher zu beleuchten.

Aufgrund der Komplexität des Explosionsprozesses werden für eine praxisnahe sicherheitstechnische Beurteilung verschiedene empirisch ermittelte sicherheitstechnische Kenngrößen wie Zündtemperatur oder Mindestzündenergie verwendet. Diese hängen jedoch von der Art und Weise ihrer Bestimmung ab und sind daher nur für einen definierten Anwendungs-

bereich verwendbar. Wird der ursprüngliche Anwendungsbereich erweitert, müssen auch die Bestimmungsverfahren weiter entwickelt werden. Ein Beispiel dafür ist der Beitrag „Schwerentzündbare Gase und Dämpfe – Erweiterung der europäischen Norm EN 1839 zur Bestimmung der Explosionsgrenzen“.

4.2 Vermeidung explosionsfähiger Gemische

Der erste gedankliche Schritt bei der Abwägung von Explosionsschutzmaßnahmen ist immer die Überlegung, ob sich explosionsfähige Atmosphäre ganz vermeiden oder zumindest einschränken lässt. Wenn sich keine unbrennbaren Ersatzstoffe einsetzen lassen, lässt sich häufig durch die Betriebsbedingungen einer Anlage explosionsfähige Atmosphäre vermeiden, in dem z. B. die Temperatur einer brennbaren Flüssigkeit genügend weit unterhalb des Flammpunktes gehalten wird, oder aber der Anteil des brennbaren Gases oder Staubes unter der unteren Explosionsgrenze gehalten wird. BAM und PTB liefern hierzu einerseits die notwendigen Stoffkennwerte in Form der sicherheitstechnischen Kenngrößen, führen andererseits aber auch (oft in Form von Forschungsvorhaben) experimentelle und rechnerische Untersuchungen exemplarischer betrieblicher Situationen durch, die dann verallgemeinert die Basis für Zonenfestlegungen in den Explosionsschutzdokumenten von Betreibern explosionsgefährdeter Anlagen oder auch für Regelungen von Staat oder Berufsgenossenschaften bilden können. Der Beitrag „Messung und Festlegung explosionsgefährdeter Bereiche – Erfahrungen aus praxisnahen Untersuchungen an Tankfahrzeugen für brennbare Flüssigkeiten“ ist ein solches Beispiel für die Untersuchung der Bildung und Ausbreitung explosionsfähiger Atmosphäre in einer typischen betrieblichen Situation.

In manchen Fällen lässt sich die zeitliche und räumliche Begrenzung der explosionsfähigen Atmosphäre nicht ausreichend sicherstellen. Dann können auf Basis eines Explosionsschutzdokuments zusätzliche Schutzmaßnahmen durch besonders geeignete Gaskonzentrationsmessgeräte, die „Gaswarngeräte“, das Mittel der Wahl sein. Ergibt die Überwachung des betroffenen Bereiches mit Gaswarngeräten, dass bestimmte Grenzkonzentrationen der brennbaren Substanz überschritten werden, können z. B. Lüftungsmaßnahmen zur Reduzierung der Konzentration ergriffen oder Geräte mit Zündquellen abgeschaltet werden. Diese Vorgehensweise ist nur in geeigneten Situationen anwendbar, und die Gaswarngeräte müssen dafür bestimmte Qualifikationen mitbringen, die im Beitrag „Gaswarnsysteme in der Sicherheitstechnik – Anforderungen an Messfunktion und funktionale Sicherheit“ dargestellt werden.

4.3 Vermeidung von Zündquellen

In explosionsgefährdeten Bereichen sind vielfältige Zündgefahren zu beachten (z. B. heiße Oberflächen, elektrostatischen Aufladungen, elektrische und mechanische Funken, optische Strahlung oder Ultraschall; Bild 4). Elektrische Zündquellen sind dabei allein auf Grund der Menge und Vielfalt der eingesetzten elektrischen Geräte die häufigste Zündquellenart. Transiente Überspannungen in elektrischen Netzen oder bei Verwendung von umrichter gespeisten drehenden elektrischen Maschinen können zu unvollständigen elektrischen Entladungen (Teil- und Vorentladungen) führen. Sie galten lange als ungefährlich, da die einzelnen Entladungen

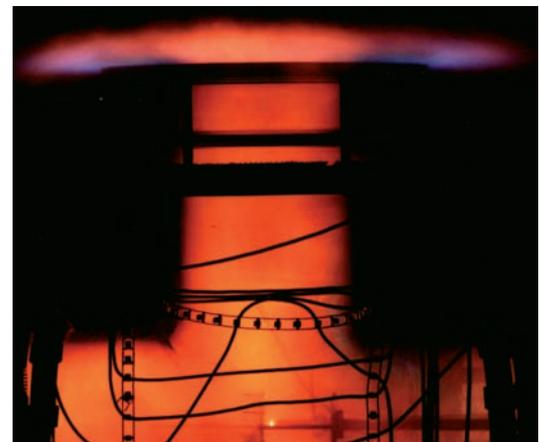


Bild 4:
Zündung einer explosionsfähigen Atmosphäre durch eine kleine heiße Oberfläche („hot spot“).

zu wenig Energie freisetzen. Inzwischen konnte gezeigt werden, dass durch mehrfache Wiederholung solcher Entladungen mit hoher Frequenz die freigesetzte Energie akkumulieren und zündwirksam werden kann. Im Beitrag „Zündung durch elektrische Entladungen“ wird u. a. auf das Zündverhalten solcher Entladungsformen eingegangen.

Im Fall von technischen Defekten können in mechanischen Geräten wie Getrieben, Pumpen, Rührwerken oder dynamischen Dichtungen durch Schlagvorgänge oder durch kontinuierliche metallische Reibung wirksame Zündquellen entstehen. Dies sind einerseits abgetrennte Partikel hoher Temperatur (mechanische Funken) und bei Reibvorgängen zusätzlich entstehende heiße Oberflächen. Der Beitrag „Mechanisch erzeugte Reib- und Schlagfunken im Vergleich“ greift dieses Thema auf und verdeutlicht Gemeinsamkeiten und Unterschiede bei der Funkenentstehung sowie insbesondere in der Zündwirksamkeit.

Neben Untersuchungen der Zündvorgänge ist die adäquate Vermeidung von Zündquellen in neuartigen elektrotechnischen Anwendun-

gen ein wichtiges Aufgabenfeld. Durch die hohe Innovationsgeschwindigkeit in diesem Bereich ergibt sich ein entsprechender Forschungs- und Entwicklungsbedarf für neue Explosionsschutzkonzepte, die dieser technischen Entwicklung angepasst sein müssen. An der Entwicklung neuer Lösungen sind PTB-Mitarbeiter wesentlich beteiligt, was kürzlich mit dem Technologietransferpreis 2010 der Industrie- und Handelskammer Braunschweig für Dr. Udo Gerlach, Dr. Ulrich Johannsmeyer und Dipl.-Ing. Thomas Uehlken und ihren Transfer „Eigensicheres Energieversorgungssystem mit hoher elektrischer Leistung im Explosionsschutz – „Power-i“/DART“ gewürdigt wurde. Ein weiteres Beispiel sind die Brennstoffzellen. Um solche innovativen Technologien für den Betrieb innerhalb explosionsgefährdeter Bereiche zu qualifizieren, muss ein Explosionsschutzkonzept auf Grundlage einer Zündgefahrenbewertung entwickelt werden. Dies wird im Beitrag „Zündgefahren einer PEM-Brennstoffzelle hinsichtlich innerer explosionsartiger Verbrennungsreaktionen“ behandelt.

4.4 Begrenzung der Auswirkungen einer Explosion

Oft werden durch relativ kleine Explosionen große Schäden durch nachfolgende Brände und Versagen von Gebäudestrukturen ausgelöst. Solche Ereignisketten und Folgeschäden sind vermeidbar, wenn die beginnende Explosionsausbreitung innerhalb von Behältern und anderen Umschließungen beherrscht werden kann. Technische Maßnahmen, die anlaufende Explo-

sionen auf ein unbedenkliches Maß begrenzen, sind zum Beispiel:

- Entkopplungsmaßnahmen wie Flammensperren,
- explosionsdruckfeste Bauweise,
- Explosionsdruckentlastung,
- Explosionsunterdrückung.

Mit Explosionsdruckentlastungseinrichtungen kann das Bersten von Apparaten, Behältern und Rohrleitungen im Falle einer Explosion verhindert werden. Ein Kernproblem für die Auslegung von Druckentlastungsflächen ist die Berücksichtigung von Turbulenz erzeugenden Einbauten. Dies ist das Thema des Beitrages „Auswirkungen von Turbulenzen auf die Druckentlastung von Gasexplosionen“.

In der industriellen chemischen Reaktionstechnik werden in den letzten Jahren in zunehmendem Maße Methoden der Mikroverfahrenstechnik eingesetzt. So bezeichnet man Apparate mit typischen Rohrdurchmessern oder Strukturen innerer Anlagenteile kleiner als 1 mm. Mit Hilfe der Mikroverfahrenstechnik lassen sich bei geringeren Durchsätzen höhere Ausbeuten oder reinere Produkte erzielen als mit den üblichen Reaktionsverfahren. Zu Beginn des Einsatzes dieser Technik wurde angenommen, dass mikroverfahrenstechnische Apparaturen wegen ihrer geringen inneren charakteristischen Abmessungen „inhärent sicher“ gegenüber Zünddurchschlagsvorgängen (Deflagrations- und Detonationsvorgängen) seien. Diese Fragestellung wird im abschließenden Beitrag dieses Heftes „Sicherheit bei mikrostrukturierten Reaktoren“ näher untersucht.

POSITIONERS

precision made in germany






Standard and OEM design • Single and multi axes

micos

Phone: + 49 7634 50 57 - 0 | www.micos.ws

Herausforderungen an Dienstleistungen im Explosionsschutz

Ulrich Johannsmeyer¹, Uwe Klausmeyer²

Einleitung

In vielen industriellen oder gewerblichen Anlagen, in denen mit brennbaren Stoffen gearbeitet wird, treten explosionsgefährdete Bereiche auf. In diesen Bereichen treiben Elektromotoren Pumpen, Ventilatoren und Förderanlagen an, Thermostate und Druckwächter regeln Prozesse, elektrische Heizungen erwärmen Produkte. Da nichtexplosionsschutzgeschützte Geräte (elektrische als auch nichtelektrische) zu einer Zündquelle werden können, würde ihr Einsatz in explosionsgefährdeten Bereichen zu einer erheblichen Gefahr für die Beschäftigten, die Produktionsanlagen sowie die Umwelt werden. Über die Europäischen Richtlinien 94/9/EG und 1999/92/EG wird der Explosionsschutz europaweit seit geraumer Zeit auf eine einheitliche Grundlage gestellt. Zusätzlich wurden und werden mandatierte Europäische Normen geschaffen, um die „grundlegenden Sicherheits- und Gesundheitsanforderungen“ der ATEX-Richtlinie 94/9/EG erfüllen zu können und mit diesen harmonisierten Normen die so genannte Vermutungswirkung auf Erfüllung der Anforderungen in Anspruch zu nehmen.

Die Einteilung der explosionsgefährdeten Bereiche in Zonen ist für Gase/Dämpfe und auch für Stäube Teil der Anforderungen zum betrieblichen Explosionsschutz für den Arbeitsplatz nach Richtlinie 1999/92/EG. Auf der Grundlage einer Gefährdungsbeurteilung hat der Arbeitgeber Maßnahmen zu ergreifen, die die Sicherheit der Beschäftigten und der Umwelt gewährleisten. Die Gefährdungsbeurteilung sowie die daraus abgeleiteten Sicherheitsmaßnahmen sind in einem Explosionsschutzdokument festzuhalten. Mit den getroffenen Maßnahmen (technisch, personell, organisatorisch) wird sichergestellt, dass die minimalen Sicherheitsanforderungen an den Arbeitsplatz bezüglich Ausrüstung und Installation sowie personell und organisatorisch nach den Vorgaben der Richtlinie 1999/92/EG erfüllt sind.

Richtlinie 94/9/EG (ATEX-Richtlinie)

Für das in Verkehr bringen von Geräten und Schutzsystemen gilt die Richtlinie 94/9/EG, sie wurde in Deutschland umgesetzt durch das

Geräte- und Produktsicherheitsgesetz (GPSG). Seit dem 1. Juli 2003 können relevante Produkte nur dann entwurfs- und bestimmungsgemäß innerhalb der EU in Verkehr gebracht, unbehindert gehandelt und betrieben werden, wenn sie der Richtlinie 94/9/EG (und anderen relevanten Rechtsvorschriften) entsprechen. In der Richtlinie wird darauf hingewiesen, dass zur Beseitigung von Handelshemmnissen durch den „neuen Ansatz“, den der Rat in seiner Entschließung vom 7. Mai 1985 beschlossen hat, grundlegende Anforderungen an die Sicherheit und andere relevante Attribute festgelegt werden müssen, durch die ein hoher Schutzgrad sichergestellt wird. Diese „Grundlegenden Sicherheits- und Gesundheitsanforderungen“ sind in Anhang II der Richtlinie 94/9/EG aufgeführt. Sie nehmen Bezug auf:

- potentielle Zündquellen von Geräten zur bestimmungsgemäßen Verwendung in explosionsgefährdeten Bereichen;
- autonome Schutzsysteme, deren wesentliche Aufgabe darin besteht, nach dem Beginn einer Explosion diese umgehend zu stoppen und/oder die Auswirkungen der Explosionsflammen und -drücke zu begrenzen;
- Sicherheitsvorrichtungen, die dafür vorgesehen sind, zum sicheren Betrieb der genannten Geräte im Hinblick auf deren Zündquellen und zum sicheren Betrieb autonomer Schutzsysteme beizutragen;
- Komponenten ohne autonome Funktion, die für den sicheren Betrieb der genannten Geräte oder autonomen Schutzsysteme von grundlegender Bedeutung sind.

Die Richtlinie 94/9/EG enthält erstmals harmonisierte Anforderungen auch an nichtelektrische Geräte, an Geräte, die für den Einsatz in Bereichen bestimmt sind, in denen auf Grund von Staubbildung Explosionsgefahr besteht, sowie für Schutzsysteme. Sicherheitsvorrichtungen, die für den Einsatz außerhalb von explosionsfähigen Atmosphären bestimmt sind, aber in Bezug auf Explosionsrisiken zum sicheren Betrieb von Geräten oder Schutzsystemen erforderlich sind, beziehungsweise dazu beitragen, sind ebenfalls

¹ Dr.-Ing. Ulrich Johannsmeyer, Leiter des PTBFachbereichs „System- und Eigensicherheit“, ulrich.johannsmeyer@ptb.de

² Dr.-Ing. Uwe Klausmeyer, Leiter des PTB-Fachbereichs „Zünddurchschlagsprozesse“, uwe.klausmeyer@ptb.de

eingeschlossen. Dies ist im Vergleich zu früheren nationalen Vorschriften zu Geräten und Systemen für die bestimmungsgemäße Verwendung in explosionsgefährdeten Bereichen eine deutliche Ausweitung des Anwendungsbereichs.

Ausstellung von EG-Konformitätserklärungen nach EU-Richtlinie 94/9/EG nach dem Erscheinen neuer Normenausgaben

Der Gesetzgeber verlangt durch die Elfte Verordnung zum Geräte- und Produktsicherheitsgesetz (Explosionsschutzverordnung) auf der Basis der EU-Richtlinie 94/9/EG, Anhang II, dass der technische Erkenntnisstand, der sich schnell ändert, unverzüglich und soweit wie möglich angewandt werden muss.

Die Normungsorganisationen CENELEC und künftig auch CEN ziehen auch aus diesem Grund nach einer meist 3-jährigen Übergangsfrist Normen wieder zurück, wenn eine neue Ausgabe erschienen ist. Neue EG-Baumusterprüfbescheinigungen werden nach dieser Frist in jedem Fall auf der Basis der neuesten Ausgaben der Normen ausgestellt. Es wird davon ausgegangen, dass in diesen neuesten Ausgaben auch der neueste (sicherheits-)technische Erkenntnisstand abgebildet ist. Die Änderungen sollen im Vorwort einer neuen Normenausgabe aufgelistet und bewertet werden. Erfolgt die Bewertung „Der sicherheitstechnische Erkenntnisstand hat sich durch Erscheinen dieser neuen Ausgabe wesentlich geändert“, müssen die betroffenen Produkte innerhalb der Übergangsfrist (bis zum Zurückziehen der alten Ausgabe) einem Review und ggf. einer Re-Zertifizierung (Ergänzung zur bestehenden bzw. Ausstellung einer neuen EG-Baumusterprüfbescheinigung) unterzogen werden.

Für die Durchführung und Bewertung, ob ein bestimmtes Produkt von einer Normenänderung betroffen ist, ist allein der Hersteller verantwortlich. Der Grund liegt im so genannten „Neuen Ansatz“ (New Approach) der Europäischen Union, der die Verantwortung des Herstellers für sein Produkt in den Mittelpunkt gestellt hat. Das verbindliche Dokument ist die EG-Konformitätserklärung, in der der Hersteller die Übereinstimmung mit den Grundlegenden Sicherheits- und Gesundheitsanforderungen der Richtlinie 94/9/EG und ggf. mit anderen betroffenen EU-Richtlinien bestätigt.

Der Hersteller prüft nach Erscheinen einer neuen Normenausgabe, ob sein Produkt von den Änderungen betroffen ist. Dieser Vorgang wird durch die Auflistung der Änderungen im Vorwort der neuen Ausgabe erleichtert. Es kann nun das Problem entstehen, dass sich die vorhandene EG-Baumusterprüfbescheinigung auf die alte Norm abstützt, die EG-Konformitätserklärung jedoch mit Bezug auf die neue Normenausgabe ausgestellt werden soll.

Die Lösung des Problems kann über eines der folgenden Szenarien, bei denen die PTB auch unterstützend tätig wird, erfolgen:

Szenario 1:

Der Hersteller befindet, dass sein Produkt von den Änderungen in der neuen Ausgabe der Norm nicht betroffen ist. Dies umfasst Fälle, in denen die geänderten Anforderungen für das jeweilige Produkt nicht relevant sind oder es sich um Erweiterungen handelt.

Konsequenzen:

- Der Hersteller ändert die EG-Konformitätserklärung und legt die neuen Normenausgaben zu Grunde.
- Gleichzeitig verweist er weiter auf die EG-Baumusterprüfbescheinigung nach den alten Ausgaben. Sollten sich Akzeptanzprobleme beim Endanwender ergeben, kann der Hersteller die Aussage von einer Benannten Stelle mit Bezug auf sein spezifisches Produkt anbieten (bis hin zur Ergänzung zur EG-Baumusterprüfbescheinigung).

Szenario 2:

Der Hersteller befindet, dass sein Produkt nur minimal (z. B. formal) von den Änderungen betroffen ist.

Konsequenzen:

- Die geforderten Änderungen führen nicht zu einer Änderung der Konstruktion des Produkts. So könnte eine Prüfung hinzugekommen sein, die leicht nachgewiesen werden kann. Die Erfüllung der neuen Kriterien ist also evident.
- Der Hersteller dokumentiert die Erfüllung der neuen Anforderungen und fügt sie der Dokumentation zu seiner EG-Konformitätserklärung bei.
- Er ändert die EG-Konformitätserklärung und legt die neuen Normenausgaben zu Grunde. Gleichzeitig verweist er weiter auf die EG-Baumusterprüfbescheinigung nach den alten Ausgaben.
- Die PTB gibt (in Abstimmung mit dem AK Ex des ZVEI) für einige Standard-Fälle Informationsblätter und Checklisten heraus, die die Hersteller bei diesem Szenario unterstützen.
- Die PTB gestattet dem Hersteller, dass Produkte auch ohne neue EG-Baumusterprüfbescheinigung die neue Kennzeichnung erhalten dürfen, wenn der Hersteller die PTB darüber schriftlich informiert. Die PTB kann nach formaler Prüfung der Kennzeichnungsänderung ggf. widersprechen. Eine technische Bewertung findet dabei nicht statt.

Szenario 3:

Der Hersteller befindet, dass sein Produkt von den Änderungen betroffen ist. Er muss z. B. eine

Anforderung bzw. Prüfung nachweisen, wodurch sich ggf. die Konstruktion des Produkts geringfügig verändert.

Konsequenzen:

- Der Hersteller schickt die Dokumentation zu den durchgeführten bzw. den in der PTB durchzuführenden Prüfungen sowie die technischen Unterlagen mit den geringfügigen Änderungen an die PTB mit der Bitte um Stellungnahme bzw. Ausführung.
- Die PTB wird nach positiver Begutachtung der Prüfungen und Unterlagen einen Brief verfassen, in dem die Unbedenklichkeit bestätigt wird oder auf Wunsch auch eine Ergänzung zu der jeweiligen EG-Baumusterprüfbescheinigung (bei Akzeptanzproblemen) ausstellen.
- Gleichzeitig verweist er weiter auf die EG-Baumusterprüfbescheinigung nach den alten Ausgaben.

Szenario 4:

Der Hersteller befindetet, dass sein Produkt betroffen ist, und dass die Änderungen wesentlich sind (siehe Annex ZY der neuen Europäischen Norm).

Konsequenzen:

- Der Hersteller beantragt eine Ergänzung zur bestehenden EG-Baumusterprüfbescheinigung unter Zugrundelegung der neuen Ausgaben der Normen oder eine neue EG-Baumusterprüfbescheinigung.
- Er ändert die EG-Konformitätserklärung und legt die neuen Normenausgaben zu Grunde. Gleichzeitig verweist er auf die geänderte oder neue EG-Baumusterprüfbescheinigung.

Der internationale Markt im Explosionsschutz

Auch im Explosionsschutz nimmt die Bedeutung des internationalen Marktes immer mehr zu. Besonders die deutsche Industrie ist überdurchschnittlich abhängig vom weltweiten Handel mit Geräten und Ingenieurdienstleistungen, dessen Grundlage möglichst vollständig harmonisierte IEC/ISO-Normen, Zertifizierungsverfahren und staatliche Verordnungen sein sollten. Die Kunden für explosionsgeschützte Geräte sind überwiegend in den Bereichen der chemischen Industrie, Öl- und Gasindustrie sowie in der Pharmaindustrie angesiedelt. Für den globalen Markt benötigen Herstellerfirmen neben den Europäischen Zertifikaten (EG-Baumusterprüfbescheinigung, QS-Mitteilung für die Anerkennung der Qualitätssicherung bei der Herstellung) auch ein Zertifikat nach dem IECEx-System sowie für den nordamerikanischen Markt eine UL (Underwriters Laboratories) oder FM (Factory Mutual)-Zulassung. Die Realisierung der Vision vom

weltweit gültigen Zertifikat wird wohl noch etwas Zeit brauchen. Die PTB hat sich deshalb für die Ausstellung von ATEX-Zertifikaten und von IECEx-Zertifikaten qualifiziert. Für Hersteller bietet die PTB weiterhin durch die Partnerschaft mit UL und deren Fachexperten auf dem Gelände der PTB einen erleichterten Einstieg in den US-Markt an (siehe auch „Neue Entwicklungen in der Zusammenarbeit der PTB mit anderen Zertifizierungsstellen“).

Die Rolle der PTB im Explosionsschutz

Fragen der öffentlich-technischen Sicherheit – wozu auch der Explosionsschutz gehört – sind als Teil der Daseinsvorsorge weitgehend in die Zuständigkeit des Staates gelegt. Ihm ist damit für die ordnungsgemäße Durchführung dieses Auftrages Verantwortung übertragen. Im Bereich des Explosionsschutzes nehmen diese Verantwortung die Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) und die Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) in abgestimmter Arbeitsteilung wahr.

Ein gemeinsames Gremium von BAM und PTB in der Form des heutigen Lenkungsgremiums „Physikalisch – Chemische Sicherheitstechnik“ hat sich als eine sehr effiziente Lösung für die Wahrnehmung der Aufgaben des Staates im Explosionsschutz erwiesen. Das Aufgabengebiet erstreckt sich hier von der Beratung der Bundesregierung, der Wahrnehmung deutscher Interessen in internationalen und europäischen Normungs- und sonstigen Fachorganisationen, der Dienstleistung bis hin zur Forschung.

PTB und BAM betreiben anwendungsorientierte und pränormative Grundlagenforschung, sie entwickeln Normen zum Nutzen der deutschen Industrie und zur Aufrechterhaltung des Sicherheitsniveaus im Explosionsschutz. Zur Erzielung von Exporterleichterungen der Hersteller trifft die PTB internationale Vereinbarungen mit anderen Prüfstellen (u. a. USA, Japan, China), fördert maßgeblich das internationale IECEx-System (Prüf- und Zertifizierungsschema) und trägt darüber hinaus durch Vorträge und Gremienarbeit entscheidend zum internationalen Wissenstransfer bei. Zur Wahrnehmung dieser Aufgaben gehört, dass die PTB zum Kompetenzerhalt eigene Prüfkapazitäten für Dienstleistungsaufgaben vorhält. Das zieht nach sich, dass sie auf der Grundlage der europäischen Richtlinien auch als „Benannte Stelle“ agieren muss.

Die prüftechnische Kompetenz der PTB im Bereich des Explosionsschutzes ist deshalb die Voraussetzung dafür, dass sie durch entsprechendes Ansehen international agieren und die Interessen der deutschen Wirtschaft vertreten kann. Gleichwohl ist es die Strategie der Bundesanstalt, nur solche Prüfungen durchzuführen, die keinen Routinecharakter haben und für die

keine Voraussetzungen für eine gleichwertige Aufgabenerfüllung bei anderen Prüfstellen gegeben sind. Der Regelfall ist die Prüfung und Bewertung komplexer Systeme, bei denen das Forschungsumfeld der PTB von Nutzen ist und die Zusammenarbeit mit der BAM positiv einfließt.

Die PTB steht als „Benannte Stelle“ im europäischen Binnenmarkt im Wettbewerb mit Prüfstellen anderer Mitgliedstaaten. Die von der PTB erhobenen Gebührensätze sind Ergebnis einer internen Kosten- und Leistungsrechnung; sie haben eine Größenordnung, die einen hohen Grad an Kostendeckung ermöglicht. Diese Kostenhöhe ist Gewähr dafür, dass die PTB nicht über den Preis Vorteile am Markt erzielt. Die hohe Nachfrage nach Prüfdienstleistungen der PTB ist überwiegend darin begründet, dass ihren Zertifikaten ein hohes Vertrauenspotential entgegengebracht wird - nicht zuletzt durch ihre hohe Sachkompetenz und wirtschaftliche Unabhängigkeit.

Auch die Arbeit der PTB in wichtigen nationalen und internationalen regelsetzenden Gremien ist unter Berücksichtigung des aufgezeigten Aufgabenspektrums unerlässlich, die PTB kann hier neutral und als unabhängiger Partner agieren. So werden bevorzugt koordinierende Funktionen angestrebt, wie z. B. die Planung und Organisation von Ringvergleichen oder die Einrichtung von Wissenspools (Ex-Dienst, etc.).

Der Trend geht zu immer mehr Eigenverantwortung der Industrie, aber in Fragen der industriellen Sicherheitstechnik funktioniert die Deregulierung nur, wenn zwischen Staat und Industrie eine neutrale und fachlich kompetente Stelle mitwirkt. Sowohl Industrie als auch die betroffenen Ministerien BMWi/BMAS bewerten diese Funktion der PTB als sehr hilfreich.

Anerkennung von Hersteller-QM-Systemen

Bei der Konformitätsbewertung sind die Module der Qualitätssicherung in der Produktionsphase ein Kernelement der neuen Konzeption. In den Fällen, wo in der Richtlinie 94/9/EG eine Baumusterprüfung gefordert wird, ist auch ergänzend ein Qualitätssicherungs-Modul notwendig, abgestuft nach den Kategorien, d. h. dem Sicherheitsniveau des Produktes. Für Geräte der Kategorie 1 (Zone 0 oder 20) und für Schutzsysteme ist das Modul „QS-Produktion“ erforderlich, alternativ kann eine Prüfung des Produktes selbst durch die benannte Stelle erfolgen, was allein aus Kostengründen eine seltene Ausnahme bleiben wird. Das Gleiche gilt für die EG-Einzelprüfung, die für alle Kategorien anwendbar wäre und wohl eher für komplexe Einzelanfertigungen gedacht ist. In den Anhängen IV und VII der Richtlinie wird in gleicher Weise für die QM-Anerkennung gefordert, dass

die benannte Stelle das QM-System bewertet.

Diese und weitere Anforderungen werden so ausgelegt, dass ein allgemeines QM-System-Zertifikat nach ISO 9000 nicht ausreichend ist, sondern eine produktspezifische bzw. richtlinienspezifische Bewertung nach EN 13980 bzw. künftig IEC/ISO 80079-34 erforderlich ist. In der PTB gilt dabei der folgende Grundsatz:

Der Ex-Auditor ist ein Fachmann des Explosionsschutzes für bestimmte Zündschutzarten oder Produktgruppen und hat eine Ausbildung zur Bewertung von QS-Systemen erhalten. Grundsätzlich kann ein QS-System allein durch Experten der PTB bewertet werden; eine Ausweitung der Aktivitäten ist im Sinne der Deregulierung aber nicht gewollt in einem Markt, der bereits viele kompetente Anbieter hat. Deshalb wird ein aktuelles ISO 9000-Zertifikat einer anerkannten Stelle vorausgesetzt.

Über die richtlinienspezifische Anerkennung des QS-Systems erhält der Hersteller eine entsprechende Mitteilung (Notification). Die Befristung der Anerkennung auf drei Jahre entspricht der üblichen Vorgehensweise bei QM-System-Zertifizierungen. Innerhalb der drei Jahre wird ein Überwachungsaudit durchgeführt. Die richtlinienspezifische QM-Anerkennung dient auch als Grundlage für das IECEx-System, das einen QAR (Quality Assessment Report) erfordert, der mit seinen wichtigsten Daten im Internet eingestellt wird.

Der Trend bei den Herstellerfirmen geht zunehmend zu außerdeutschen Fertigungsstandorten. Auch die Fertigung wesentlicher Teile von Geräten bei anderen Firmen (verlängerte Werkbank) ist immer häufiger zu finden. Die PTB stellt sich darauf durch verschiedene Strategien ein:

- Nutzung externer Auditoren (z. B. China, Fernost) mit gleichem Anspruch wie an PTB-Mitarbeiter,
- Matrix-Zertifizierung bei Herstellern mit mehreren Fertigungsstandorten, aber einheitlichem QM-System,
- Auditierung von Zulieferern, die für den Explosionsschutz wichtige Baugruppen bzw. Komponenten fertigen.

Vergleichsmessungen zwischen den nach ATEX benannten Stellen und IECEx-Prüflaboratorien

Der Konvergenzprozess innerhalb der Normung muss hinsichtlich der nachhaltigen Umsetzung in die Praxis der Mess-, Prüf- und Bewertungstätigkeiten durch eine enge Kommunikation zwischen den benannten Stellen begleitet werden. Deswegen wurde unter Leitung der PTB im Jahr 2008 weltweit erstmalig damit begonnen, ein umfangreiches systematisches Programm mit Vergleichsmessungen zwischen den benannten

Stellen zu planen und umzusetzen. Gleichzeitig soll dabei ein Referenz-QM-Handbuch (ISO/IEC 17025, 17065) entstehen, so dass in Zukunft alle benannten Stellen möglichst nach denselben Regeln Geräte prüfen und zertifizieren können.

Auf die Fachbereiche des Explosionsschutzes in der PTB kommt dabei mehr und mehr die Rolle des weltweiten Koordinators bzw. die Funktion eines Referenzlaboratoriums zu. Das Programm für Vergleichsmessungen beginnt mit den Messgrößen für Explosionsdruck (Zündschutzart Druckfeste Kapselung) und Funkenzündung (Zündschutzart Eigensicherheit). Hier werden speziell präparierte Prüflinge zeitgleich an weltweit 41 Prüfstellen gesandt. Dabei sind auch unter Anwendung der ISO/IEC 17043 „Proficiency Testing“ auf die Programme des Explosionsschutzes sowie die Entwicklung von Labornormalen zur Rückführung der Messgrößen für Explosionsdruck und Zündgrenzwerte der Eigensicherheit Regeln zu erarbeiten. Mittelfristiges Ziel ist es, die Teilnahme an den Proficiency Testing Programmen zumindest im IECEx-System als verpflichtende Bedingung für die Ausstellung von IECEx-Zertifikaten festzuschreiben. Erste Ergebnisse aus den bereits laufenden Vergleichsmessungen werden für den Beginn des Jahres 2011 erwartet.

Neue Entwicklungen in der Zusammenarbeit der PTB mit anderen Zertifizierungsstellen

Insbesondere in Fragen der Sicherheit arbeiten Kompetenzstellen mit höchster Motivation international zusammen, um ihre Erfahrungen im Sinne des optimalen Schutzes der Bevölkerung

auszutauschen. Der wissenschaftlich-technische Erkenntnisstand im Fachgebiet des Explosionsschutzes wird daher auch nicht mehr in nationalen, sondern in internationalen ISO- und IEC-Normen niedergeschrieben. Die Regelwerke werden weltweit u. a. zur Durchführung von Konformitätsbewertungen an explosionsgeschützten Geräten angewendet. Um die Gleichförmigkeit der alltäglichen Anwendung in den weltweit über 50 Laboratorien sicherzustellen, haben alle Laboratorien ein Interesse an einer möglichst engen Zusammenarbeit. Underwriters Laboratories Inc. (UL) und die Physikalisch-Technische Bundesanstalt haben sich daher entschlossen, einige ihrer Fachexperten auf dem Gelände der PTB in einer Arbeitsgruppe zusammenarbeiten zu lassen. Hauptsächlich die Konformitätsbewertungen auf der Basis der Normengruppe der IEC 60079-0 werden in gemeinsamen Teams durchgeführt.

Die Fachexperten von UL bearbeiten auch Konformitätsbewertungen nach US-amerikanischen Standards (NEC-Artikel 500/Division 1 und 2, NEC-Artikel 505/Zone, Class I, II und III). Die deutschen Hersteller können durch die enge Zusammenarbeit von UL und PTB nun in Braunschweig sowohl Zulassungen für den nordamerikanischen Markt als auch für den EU-Binnenmarkt erhalten. Dieses stellt eine erhebliche Vereinfachung für den Zulassungsprozess zu den wichtigsten Märkten dar. UL und PTB werden den Erfolg der engen Zusammenarbeit anhand von Kundenbefragungen überprüfen und bei positiver Rückmeldung weiter ausbauen. Auch andere Kompetenzstellen des Explosionsschutzes sind eingeladen, sich diesem Organisationsmodell anzuschließen.

CHEMSAFE 2011

Wolfgang Möller¹, Alexander Seifert²

Entstehung der Datenbank CHEMSAFE

Anwender in Industrie, Handel, Handwerk und Behörden benötigen verlässliche, von Fachleuten bewertete Kenngrößen des Brand- und Explosionsschutzes, um Brand- und Explosionsgefahren beim Verarbeiten, Abfüllen, Lagern, Befördern und Entsorgen brennbarer Stoffe beurteilen und angemessene Schutzmaßnahmen ergreifen zu können.

Diese Daten liefert die Datenbank CHEMSAFE. Sie wird von der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) gemeinsam mit der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) und der Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e. V. (DECHEMA) betrieben. CHEMSAFE enthält bewertete sicherheitstechnische Kenngrößen von brennbaren Flüssigkeiten, Gasen und Stäuben. Die Bewertung der brennbaren Gase und Stäube erfolgt durch die BAM, die der brennbaren Flüssigkeiten durch die PTB.

Die Datenbank CHEMSAFE entstand im Rahmen von Forschungsvorhaben in den Jahren 1985 bis 1993. Gefördert wurden diese Vorhaben vom Bundesministerium für Forschung und Technologie, dem Bundesministerium für Wirtschaft, dem Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften sowie dem Verband der chemischen Industrie.

Nach Ablauf der Vorhabensphasen schlossen BAM, PTB und die Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e. V. (DECHEMA) einen Kooperationsvertrag, der eine kontinuierliche Pflege und Weiterentwicklung der Datenbank gewährleistet. Der ProcessNet-Arbeitsausschuss „Sicherheitstechnische Kenngrößen“, dem Explosionsschutz-Fachleute aus Hochschulen, Industrie und Behörden angehören, begleitet seit 1985 die Datenbank wissenschaftlich, ein Lenkungsausschuss – gebildet aus den Projektpartnern und den Zuwendungsgebern – fungiert als „Aufsichtsrat“.

Herkunft und Pflege der Daten

Quellen der Daten sind Messungen der auf die Ermittlung und Bewertung sicherheitstechnischer Kenngrößen spezialisierten Laboratorien der BAM und der PTB sowie deren Literatur- und Datenbankrecherchen. Datenlücken können in einigen Fällen durch die Anwendung von Abschätzverfahren geschlossen werden. Beispiele sind in der PTB entwickelte Verfahren zur Abschätzung des Flammpunkts und der unteren Explosionsgrenze [1].

Alle Daten werden auf ihre Verlässlichkeit geprüft und bewertet. Wenn die Bewertung zu einer Empfehlung führt, wird dies bei der Ausgabe der Daten angezeigt. So kann der Anwender die Daten filtern, um sich ausschließlich die von BAM und PTB empfohlenen Werte anzeigen zu lassen.

Zu den in CHEMSAFE gespeicherten Kenngrößen gehören unter anderem:

- Flammpunkt
- Zündtemperatur
- untere und obere Explosionsgrenze
- unterer und oberer Explosionspunkt
- Sauerstoffgrenzkonzentration
- Mindestzündenergie
- Normspaltweite
- Stabilitätsgrenzdruck
- maximaler Explosionsdruck
- maximaler zeitlicher Druckanstieg
- Glimmtemperatur
- Schwelppunkt

Neben den bewerteten sicherheitstechnischen Kenngrößen sind folgende Informationen abrufbar:

- Angaben zur Stoffidentifikation
- thermophysikalische Daten
- Kennzeichnung und Klassifizierungen nach nationalen und internationalen Vorschriften
- bibliographische Angaben
- Definitionen und Hilfen zu den Kenngrößen

Die Datenbank wird jährlich aktualisiert und um neue Reinstoffe und Gemische erweitert. Zunehmend werden auch Kenngrößen, die bei nicht-atmosphärischen Bedingungen bestimmt

¹ Dr. Wolfgang Möller, Leiter der PTB-Arbeitsgruppe „Beratung und Datenbanken im Explosionsschutz“, wolfgang.moeller@ptb.de

² Dipl.-Ing. Alexander Seifert, BAM-Arbeitsgruppe „Informationssysteme, CHEMSAFE“, alexander.seifert@bam.de

wurden (erhöhte oder erniedrigte Drücke und Temperaturen, andere Oxidationsmittel als Luft z. B. Sauerstoff, Chlor, Lachgas) in die Datenbank aufgenommen.

Zurzeit sind etwa 70 000 Datensätze von über 3000 Reinstoffen sowie von etwa 2800 Gemischen gespeichert.

Nutzung der Daten

Zu den Kunden der Datenbank CHEMSAFE gehören Firmen der chemischen Industrie, deutsche und internationale Behörden sowie Forschungseinrichtungen und Universitäten. Bild 1 zeigt, dass über die Hälfte der Kunden aus den USA, Japan und Deutschland kommen.

Die in CHEMSAFE empfohlenen Werte finden auch Eingang in internationale Normen (z. B. IEC 60079-20-1:2010 oder ISO 10156:2010), nationale Regelungen (z. B. Berufsgenossenschaftliche Regeln BGR 500 Abschnitt Gase „Tabelle chemisch instabiler Gase“, Technische Regeln für Betriebssicherheit TRBS 2152-2 bzw. Technische Regeln für Gefahrstoffe TRGS 722) sowie in andere Datenbanken (Gefahrgutdatenbank der BAM, Gemeinsamer zentraler Stoffdatenpool Bund/Länder - GSBL). Der europäische Leitfaden „Guidance on the Application of the CLP Criteria“ empfiehlt ebenfalls die Verwendung der Datenbank CHEMSAFE.

Darüber hinaus ist die Datenbank auch Grundlage von Tabellenbüchern [2, 3].

Zugangsmöglichkeiten

Um unterschiedlichen Kundeninteressen gerecht zu werden und eine möglichst große Verbreitung der Daten zu gewährleisten, gibt es mehrere Zugangsvarianten der Datenbank CHEMSAFE:

Online wird sie vom Datenbankanbieter STN International angeboten, der auch viele andere chemische Faktendatenbanken anbietet wie die bedeutende Datenbank Chemical Abstracts.

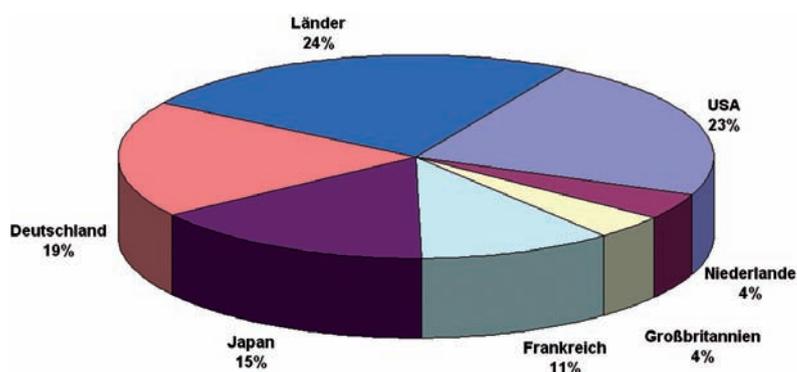


Bild 1: Online-Kunden der Datenbank CHEMSAFE 2009, sortiert nach Herkunft

„Chemsafe ...on the WEB“ ist eine weitere Zugangsmöglichkeit, die über den Internetauftritt der DECHEMA ermöglicht, Daten ohne Kenntnisse einer speziellen Suchsprache abzufragen.

Inhouse ist die Datenbank über eine auf dem Datenbanksystem ORACLE basierende Version erhältlich, die es ermöglicht, auch Daten der Kunden gemeinsam mit CHEMSAFE-Daten zu verwalten. Diese Version ist mit einer benutzerfreundlichen grafischen Oberfläche versehen, die ein Arbeiten mit der Datenbank vereinfacht. Die Inhouse-Version bietet auch die Möglichkeit, Daten grafisch darzustellen (Bild 2–4).

Eine preiswerte Inhouse-Version ist CHEMSAFE-Lite, die ohne zusätzliche Datenbanksoftware auskommt. Diese eingeschränkte Version enthält nur die empfohlenen Daten ohne die zugrunde liegende Hintergrundliteratur.

Berechnungsverfahren

Da nicht für alle denkbaren Gemischzusammensetzungen Kenngrößen bestimmt werden können, bietet die Inhouse-Version der Datenbank die Möglichkeit, aus gespeicherten Reinstoffdaten Kenngrößen von Gemischen zu berechnen. Bisher gibt es die folgenden drei Größen, für die eine zuverlässige Berechnung möglich ist:

- Berechnung der Brennbarkeit von Gasgemischen nach ISO 10156:2010(E)

Aus den in CHEMSAFE gespeicherten Teiwerten (T_{ci} : maximaler Stoffmengenanteil eines Brenngases im Gemisch mit Stickstoff, bei dem das Brenngas/Stickstoff-Gemisch in beliebiger Vermischung mit Luft nicht mehr entzündbar ist), kann für viele Gemische ermittelt werden, ob sie in Luft brennbar sind.

- Berechnung des Oxidationspotentials von Gasgemischen nach ISO 10156: 2010 (E)

Aus dem ebenfalls in der Datenbank abgelegten Sauerstoffäquivalenzkoeffizienten von oxidierenden Gasen kann das Oxidationspotential von Gasgemischen nach ISO 10156: 2010 (E) berechnet werden.

- Berechnung der Normspaltweite von Gemischen

Aus den stöchiometrischen Brennstoffanteilen im Gemisch mit Sauerstoff und den Normspaltweiten der Komponenten eines Gemisches kann die Normspaltweite des Gemisches berechnet werden.

Zusammenfassung

Die Forderung nach verlässlichen, aktuellen und schnell verfügbaren Daten des Brand- und Explosionsschutzes erfüllt die Datenbank CHEMSAFE. Sie ist inzwischen zu einer Institution geworden und wird von den Projektpartnern BAM, PTB und DECHEMA gepflegt und weiterentwickelt.

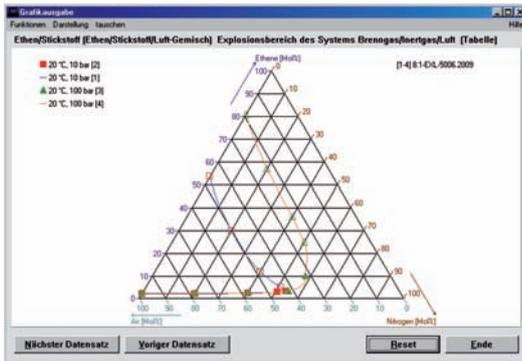


Bild 2: Beispiel für die grafische Darstellung in der Inhouse-Version: Dreiecksdiagramm

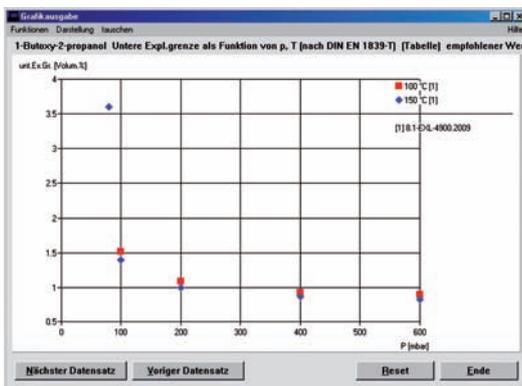


Bild 3: Beispiel für die grafische Darstellung in der Inhouse-Version: Abhängigkeit der Explosionsgrenzen vom Druck

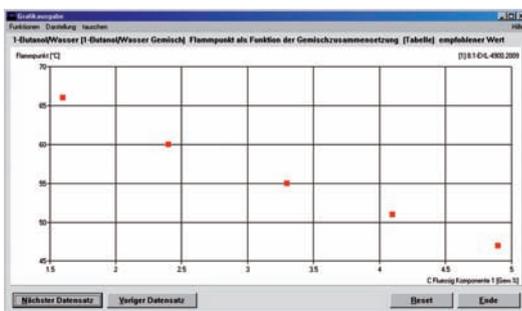


Bild 4: Beispiel für die grafische Darstellung in der Inhouse-Version: Abhängigkeit des Flammpunkts von der Gemischzusammensetzung

Literatur

- [1] W. Möller, P. Schulz, T. Redeker: Verfahren zur Abschätzung des Flammpunktes und der unteren Explosionsgrenze, PTB-Bericht W 55, Wirtschaftsverlag NW, Verlag für neue Wissenschaft, Bremerhaven 1993
- [2] E. Brandes, W. Möller: Safety Characteristic Data – Flammable Liquids and Gases, 2nd ed., Vol. 1, Wirtschaftsverlag NW, Verlag für neue Wissenschaft, Bremerhaven 2008.
- [3] M. Molnarne, Th. Schendler, V. Schröder: Safety Characteristic Data – Explosion Regions of Gas Mixtures, 2nd ed., Vol. 2, Wirtschaftsverlag NW, Verlag für neue Wissenschaft, Bremerhaven 2008.

Schwer entzündbare Gase und Dämpfe – Erweiterung der europäischen Norm EN 1839

Elisabeth Brandes¹, Joachim Milde² und Volkmar Schröder³

1 Einführung

Ab Januar 2011 dürfen nach der europäischen Richtlinie 2006/40/EG über Emissionen aus Klimaanlage in Kraftfahrzeugen [1] bei neuen EG-Typzulassungen die PKW-Klimaanlagen nur noch Kältemittel enthalten, deren Global Warming Potential (GWP) kleiner 150 ist. Der vorgeschlagene Ersatzstoff für das bisher verwendete R-134a (1,1,1,2-Tetrafluorethan, GWP = 1430) ist 2,3,3,3-Tetrafluorpropen (R-1234yf; GWP = 4). Im Gegensatz zu R-134a, das bei Umgebungsbedingungen keinen Explosionsbereich aufweist, kann 2,3,3,3-Tetrafluorpropen bei Umgebungsbedingungen explosionsfähige Gemische mit Luft bilden.

Die Neufassung der DIN EN 378-1 [2], die 2008 in Kraft getreten ist, klassifiziert Kältemittel nach deren Brennbarkeit in drei Kategorien: nicht entzündbar, geringe Brennbarkeit, größere Brennbarkeit.

International ist eine analoge Klassifizierung für Kältemittel in der ISO 817:2005 [3] zu finden.

Gase ‚geringer Brennbarkeit‘ und Flüssigkeiten die keinen Flammpunkt nach Norm aufweisen, aber einen Explosionsbereich in Luft haben, werden zur Gruppe der so genannten schwer entzündbaren Gase und Dämpfe (Flüssigkeiten) zusammengefasst.

Solche Gase werden unter anderem häufig als Kältemittel in Wärmepumpen und Klimaanlage eingesetzt und werden daher in beträchtlichen Mengen in Verkehr gebracht.

2 Definition der Entzündbarkeit von Gasen und Dämpfen in technischen Regelwerken

Gase

Im internationalen GHS [4] und in der EU-Verordnung 1272-2008 (CLP-VO) [5] ist die Entzündbarkeit von Gasen wie folgt definiert: Entzündbare Gase sind „Gase oder Gasgemische, die in Luft bei 20 °C und einem Standarddruck von 101,3 kPa einen Explosionsbereich haben“. Es werden 2 Kategorien von entzündbaren Gasen definiert:

- Kategorie 1:
Gase, die bei 20 °C und einem Standarddruck von 101,3 kPa entzündbar sind, wenn sie im Gemisch mit Luft mit einem Volumenanteil von 13 % oder weniger vorliegen oder in Luft einen Explosionsbereich von mindestens 12 Prozentpunkten haben, unabhängig von der unteren Explosionsgrenze.
- Kategorie 2:
Nicht in Kategorie 1 fallende Gase, die im Gemisch mit Luft bei 20 °C und einem Standarddruck von 101,3 kPa einen Explosionsbereich haben.

In der DIN EN 378-1 werden drei Gruppen von Kältemitteln definiert.

- In der Gruppe 1 „Nicht entzündbar“ sind Gase, bei denen es bei 60 °C und 101,3 kPa zu keiner Flammenausbreitung kommt, die also bei diesen Bedingungen keinen Explosionsbereich haben.
- In der Gruppe 2 „Geringere Brennbarkeit“ darf eine Flammenausbreitung bei 60 °C und 101,3 kPa erst oberhalb 3,5 Vol.-% (UEG) auftreten und die Verbrennungsenthalpie muss kleiner als 19 kJ/g sein. Die ISO 817:2005 definiert zusätzlich eine Untergruppe „2L“ bei der die laminare Verbrennungsgeschwindigkeit $\leq 0,1$ m/s sein muss.
- In der Gruppe 3 „Größere Brennbarkeit“ darf bereits unterhalb von 3,5 Vol.-% Flammenausbreitung auftreten und die Verbrennungsenthalpien dürfen größer als 19 kJ/g sein.

Dämpfe (Flüssigkeiten)

In der EU-Verordnung 1272-2008 (CLP-VO) ist die Entzündbarkeit von Flüssigkeiten (Dämpfen) wie folgt definiert: Entzündbare Flüssigkeiten sind „Flüssigkeiten mit einem Flammpunkt von maximal 60 °C“

Daneben sind Flüssigkeiten zu kennzeichnen (EUH018 – „Kann bei Verwendung explosionsfähiger/entzündbare Dampf/Luft-Gemische bilden“), die selbst nicht als entzündbar eingestuft sind, die jedoch explosionsfähige/entzündbare Dampf/Luft-Gemische bilden können.

Dies kann vor allem bei Halogenkohlenwasserstoffen der Fall sein und bei Gemischen, wenn

¹ Dr. Elisabeth Brandes, Leiterin der PTB-Arbeitsgruppe „Kenngrößen des Explosionsschutzes“, elisabeth.brandes@ptb.de

² Dipl.-Ing. Joachim Milde, ehemals BAM-Fachgruppe „Gase, Gasanlagen“,

³ Dr. Volkmar Schröder, Leiter der BAM-Fachgruppe „Gase, Gasanlagen“, volkmar.schroeder@bam.de

sie einen entzündbaren flüchtigen Bestandteil enthalten oder wenn ein Verlust eines nicht entzündbaren flüchtigen Bestandteils vorliegt’.

3 Charakterisierung der Eigenschaft „schwer entzündbar“ durch sicherheitstechnische Kenngrößen

Obwohl in keinem der zitierten Regelwerke explizit eine Definition für „schwer entzündbare“ Gase und Dämpfe gegeben wird, werden landläufig die Kategorie 2 der entzündbaren Gase nach CLP-VO, die Kategorie 2 der Kältemittel nach EN 378 bzw. ISO 817 und Flüssigkeiten, die keinen Flammpunkt nach Norm aber einen Explosionsbereich aufweisen unter dieser Bezeichnung zusammengefasst, da sie eine deutlich geringere Explosionsgefährdung verursachen.

Auf nationaler Ebene wird dieser geringeren Explosionsgefährdung z. B. in der TRBS 2152 Teil 1 [6] in 3.4.2 ‚Beurteilung der Explosionsauswirkung‘ Rechnung getragen

... ‚Bemerkung 3: Eine das übliche Maß unterschreitende Explosionsgefährdung ist z. B. bei der Handhabung von Chlor-Kohlenwasserstoff-Verbindungen (CKW) gegeben. Für CKW, die einen Explosionsbereich, jedoch keinen Flammpunkt besitzen, gilt, dass Geräte verwendet werden dürfen, die für die jeweils um eine Stufe weniger gefährliche Zone geeignet sind...‘

Allerdings gibt es aktuell keine allgemeingültigen Kriterien für die Eigenschaft „schwer entzündbar“ bei Gasen und Dämpfen. In der ASTM E 681-09 [7], der US-Norm für die Bestimmung von Explosionsgrenzen, gibt es zwar bereits einen Annex für ‚schwer entzündbare‘ Gase und Dämpfe. In diesem Annex wird jedoch weder eine Definition der Eigenschaft „schwer entzündbar“ gegeben, noch werden Zahlenwerte zur Charakterisierung genannt. Es wird lediglich auf Substanzen mit großen Normspaltweiten verwiesen und es werden Ammoniak sowie teilhalogenierte Kohlenwasserstoffe, u. a. Dichlormethan als Beispiele genannt.

Da sich ‚schwer entzündbare‘ Gase und Dämpfe durch eine deutlich geringere Explosionsgefährdung (z. B. enger Explosionsbereich, geringere Auswirkung nach Zündung) auszeichnen, könnten die sicherheitstechnischen Kenngrößen untere Explosionsgrenze (UEG), Explosionsbereich, Verbrennungsenthalpie (ΔH_c), Normspaltweite (NSW), laminare Flammgeschwindigkeit ($V_{F, \text{laminar}}$), Druckanstieggeschwindigkeit und Mindestzündenergie (MZE) zur Charakterisierung dienen. In Tabelle 1 sind die entsprechenden Werte einiger dieser Kenngrößen vergleichend für Wasserstoff, Methan, n-Hexan, Ammoniak und Dichlormethan zusammengestellt. Wasserstoff steht dabei für ein sehr leicht entzündbares Gas, während Ammoniak und Dichlormethan ‚schwer entzündbare‘ Substanzen repräsentieren.

Tabelle 1: Sicherheitstechnische Kenngrößen zur Charakterisierung der Entzündbarkeit

Kenngröße	Wasserstoff	Methan	n-Hexan	Ammoniak	Dichlormethan
UEG (g/m ³)	3,3	29,0	35,0	99,0 ¹⁾	500 ¹⁾
Explosionsbereich (Vol.-%)	4,0 – 77,0	4,4 – 17,0	1,0 – 8,9	14,0 – 33,6 ¹⁾	14,2 – 22,0 ¹⁾
Flammpunkt (°C)	–	–	< – 20	–	Kein Flammpunkt
MZE (mJ)	0,017	0,29	0,24	14	9300
NSW (mm)	0,29	1,14	0,93	3,18	> 5
ΔH_c (kJ/g)	120	50	48,7	18,6	7,1
$V_{F, \text{laminar}}$ (m/s)	3,1	0,4	0,36	0,07	0,05

¹⁾ Ergebnisse nach modifiziertem Bestimmungsverfahren [10]

Auch verlaufen die Explosionen (Deflagrationen) stöchiometrischer Gas-Luft-Gemische von leicht und schwer entzündbaren Gasen, untersucht im geschlossenen Explosionsgefäß, mit stark unterschiedlicher Geschwindigkeit. In Bild 1 sind die Druck-Zeit-Verläufe für die drei Gase aus Tabelle 1 wiedergegeben.

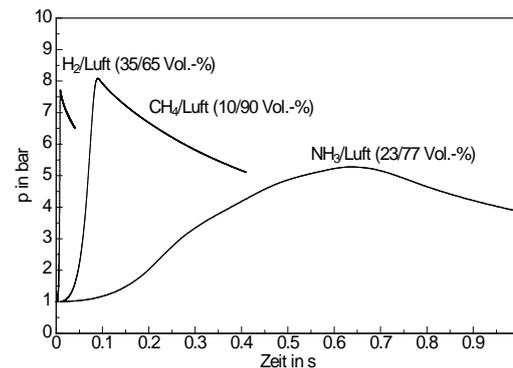


Bild 1: Druckverlauf von Gasexplosionen nach Zündung von etwa stöchiometrischem Gemisch im kugelförmigen Autoklav (V = 14 dm³)

Auch wenn die Regelwerke explizit keine Definition für „schwer entzündbare“ Gase und Dämpfe geben, wird jedoch deutlich, dass, wenn auch indirekt, zur Charakterisierung die Explosionsgrenzen herangezogen werden.

Daher war zu klären, ob das für Europa in der harmonisierten Norm EN 1839 [8] festgelegte Bestimmungsverfahren auch für die Bestimmung der UEG von ‚schwer entzündbaren‘ Gasen und Dämpfen geeignet ist.

4 Erweiterung der EN 1839 für schwer entzündbare Gase und Dämpfe

Mit Mandat der Working Group 1 „Prüfmethoden zur Bestimmung sicherheitstechnischer Kenngrößen brennbarer Stoffe“ des CEN TC 305 ist auf Grundlage der experimentellen Untersuchungen einer Diplomarbeit [9] bei BAM und PTB ein Verfahren zur Bestimmung der Explosionsgrenzen schwer entzündbarer Gase und Dämpfe ausgearbeitet worden [10].

Ausgangspunkt waren Untersuchungen des US-Kältemittelverbandes ASHRAE [11] zum Einfluss apparativer Parameter auf die Explosionsgrenzen von Kältemitteln. Für diese Untersuchungen wurde die Apparatur nach ASTM E681 modifiziert. Wesentliche Erkenntnisse aus dieser Arbeit waren:

- Der als Zündgefäß verwendete 5-dm³-Rundkolben aus Glas musste durch einen Kolben von 12 dm³ Volumen ersetzt werden.
- Nur Hochspannungsfunken (15 kV, 30 mA Kurzschlussstrom) waren als Zündquelle geeignet. Ein schmelzender Draht erwies sich als nicht geeignet.
- Bei halogenierten Substanzen muss eine bestimmte Feuchtigkeit der Luft vorhanden sein. Hier wurden 50 % rel. Feuchte bei 23 °C vorgeschlagen.
- Das Kriterium für eine „Flammenausbreitung“ wurde verändert. Anstelle einer einfachen schmalen Flamme, die sich mindestens bis 10 mm unterhalb des oberen Randes des Kolbens ausbreiten muss, wurde jetzt eine breitere Flamme mit einem Winkel der Flammenausbreitung von min. 90° vorgeschlagen.

Insbesondere dieses letzte Kriterium führte zu einer Einengung der Explosionsbereiche von Kältemitteln.

Im Rahmen der Diplomarbeit [9] wurden Untersuchungen zum Einfluss apparativer Parameter mit Zündgefäßen der EN 1839 und weiteren modifizierten Zündgefäßen durchgeführt. Im Einzelnen wurden die in Tabelle 2 aufgeführten Apparaturen eingesetzt.

Mit diesen Apparaturen wurden folgende Einflüsse auf die Explosionsgrenzen untersucht:

Abmessungen des Zündgefäßes (Durchmesser und Höhe), Zündquelle (Art und Dauer des Zündfunkens), Kriterium (visuell oder Druckmessung) und Luftfeuchte (trocken und 50 % RH bei 23 °C). Die Einflüsse wurden mit zwei typischen, schwer entzündbaren Substanzen stellvertretend untersucht. Für Gase ist Ammoniak (NH₃), für Dämpfe Dichlormethan (CH₂Cl₂) ausgewählt worden.

5 Experimentelle Ergebnisse

Die Ergebnisse der Untersuchungen für Ammoniak und Dichlormethan sind in den Tabellen 3 und 4 zusammengefasst.

Die Untersuchungen zeigten, dass die Rohrapparatur nach EN 1839 durchaus geeignet ist, die Explosionsgrenzen von schwer entzündbarer Gasen und Dämpfen zu bestimmen. Größere Rohrdurchmesser als 80 mm führten zu keiner signifikanten Erweiterung der Explosionsbereiche. Allerdings ließ sich, auf Grund der bei ‚schwer entzündbaren‘ Gasen und Dämpfen oftmals zu beobachtenden langen Flammen (Aureolen) oberhalb der Funkenstrecke, im 300-mm-Rohr die Flammenablösung nur sehr schwer beobachten. Hier erweist sich ein etwas längeres Rohr von 500 mm und die Beobachtung der Flammenablösung mittels Videotechnik und Zeitlupe als hilfreich.

Das Bombenverfahren der EN 1839 erwies sich als nicht geeignet. Insbesondere beim Dichlormethan, der Modellschubstanz für teilhalogenierte Kältemittel, wurden sowohl mit Draht-

Tabelle 2:
Laborapparaturen zur Bestimmung der Explosionsgrenzen

Apparatur	Zündgefäß	Zündquelle	Kriterium
nach EN 1839 „Rohrmethode“	senkrechter Glaszylinder, Ø = 80 mm, H = 300 mm	Induktionsfunken Dauer 0,2 s – 0,5 s	visuell, Flammenablösung um 100 mm oder Aureole zum Deckel
nach EN 1839 „Bombenmethode“	geschlossene Kugel aus Edelstahl V = 5 dm ³ und 14 dm ³	Schmelzdraht, E = 10 J bis 20 J oder Induktionsfunken	Druckanstieg ≥ 5 % + Zünddruck in Luft
Wechselrohrapparatur	senkrechte Glaszylinder, Ø = (60 – 250) mm, H = (300 – 1200) mm	Induktionsfunken Dauer 0,2 s – 0,5 s	visuell, Flammenablösung um 100 mm oder Aureole zum Deckel
500-mm-Rohrapparatur	senkrechte Glaszylinder, Ø = (80 und 150) mm, H = 500 mm	Induktionsfunken Dauer 0,2 s – 0,5 s	visuell, Flammenablösung um 100 mm oder Aureole zum Deckel
nach ASTM E681 (Standard)	Glasrundkolben V = 5 dm ³	Induktionsfunken Dauer 0,2 s – 0,5 s	visuell, Flammenausbreitung bis 10 mm unter den oberen Rand
nach ASTM E681 (Annex)	Glasrundkolben V = 12 dm ³	Induktionsfunken Dauer 0,2 s – 0,5 s	visuell, Flammenausbreitung im Winkel von min. 90 ° bis 10 mm unter den oberen Rand

Tabelle 3:
Prüfergebnisse für Ammoniak

Prüfverfahren	Rohr/ Kugel	UEG (Vol.-%)	OEG (Vol.-%)
Wechselrohr- apparatur	60/300 mm	15,0	31,2
	95/300 mm	15,0	31,0
	150/300 mm	15,0	31,0
	200/300 mm	15,4	31,4
	250/300 mm	15,4	31,2
EN 1839 Rohr	60/300 mm	14,4	31,4
	80/300 mm	14,4	32,0
500-mm-Rohr	80/500 mm	13,8	31,2
	150/500 mm	13,6	31,4
ASTM E 681	5 dm ³	13,3	32,9
¹⁾	12 dm ³	15,2	30,0
¹⁾	12 dm ³ , gedreht	15,2	30,0
EN 1839 Bombe ²⁾	14 dm ³	14,2	39,4

¹⁾ Kriterium 90°-Winkel,

²⁾ Drahtzündler (explodierender Draht)

zündler als auch mit dem Induktionsfunken nur unzureichende Ergebnisse erzielt (siehe Tab. 4). Das beim Bombenverfahren zur Indikation der Zündung verwendete Druckschwellenkriterium (Zündung: $\Delta p > P_z + 1,05 \cdot P_o$ mit P_z Druck nach aktivieren der Zündquelle in Luft; P_o : Ausgangsdruck) ist für schwer entzündbare Gase offensichtlich weniger geeignet als die visuelle Beobachtung der Flamme.

Bei Dichlormethan wurde ein signifikanter Einfluss der Luftfeuchte beobachtet. Die Befuchtung der Luft senkte die untere Explosionsgrenze um 0,6 Vol.-%.

Scheinbar nicht erklärbar sind die Ergebnisse, die in der Wechselrohrapparatur gemessen wurden. Obwohl Rohrdurchmesser und Rohrlängen auch der Geometrie der Rohrapparatur nach EN 1839 entsprachen, ist mit Dichlormethan keine Entzündung gefunden worden. Die Ursache dafür ist in der Bauweise der Zünder zu vermuten. Die Zünder Elektroden waren hier mechanisch besonders massiv ausgeführt und hatten, senkrecht von unten durch den Boden geführt, einen Abstand von nur 10 mm. Wahrscheinlich bewirkt diese Bauweise eine Löschung der entstehenden Flammen. Die Berechnung der Gasströmung bei einem Funken in Luft mit dem Programm COMSOL [12] unterstützte diese Vermutung. Bei eng stehenden, massiven Elektroden ist die Auftriebsströmung zwischen den Elektroden (Kamineffekt) gestört. Möglicherweise reicht dies aus, um in extremen Fällen eine Flammenausbreitung von der Zündquelle zu verhindern (siehe Bild 2).

Tabelle 4:
Prüfergebnisse für Dichlormethan

Prüfverfahren	Rohr/Kugel	UEG (Vol.-%)	OEG (Vol.-%)	
Wechselrohr- apparatur	60/300 mm	keine Zündung	keine Zündung	
	95/300 mm	keine Zündung	keine Zündung	
	150/300 mm	keine Zündung	keine Zündung	
	200/300 mm	keine Zündung	keine Zündung	
	250/300 mm	keine Zündung	keine Zündung	
EN 1839 Rohr	60/300 mm	15,4	20,4	
	80/300 mm	14,8	20,8	
³⁾	80/300 mm	14,2	23,0	
500-mm-Rohr	80/500 mm	14,8	20,8	
	150/500 mm	14,8	20,8	
ASTM E 681	5 dm ³	-	-	
¹⁾	12 dm ³	keine Zündung	keine Zündung	
¹⁾	12 dm ³ , gedreht	keine Zündung	keine Zündung	
EN 1839 Bombe ²⁾	14 dm ³	keine Zündung	keine Zündung	
	5 dm ³	keine Zündung	keine Zündung	
	³⁾	5 dm ³	keine Zündung	keine Zündung
	20 dm ³	keine Zündung	keine Zündung	
	³⁾	20 dm ³	15,0	-

¹⁾ Kriterium 90°-Winkel, ²⁾ Drahtzündler (explodierender Draht), ³⁾ Luft befeuchtet

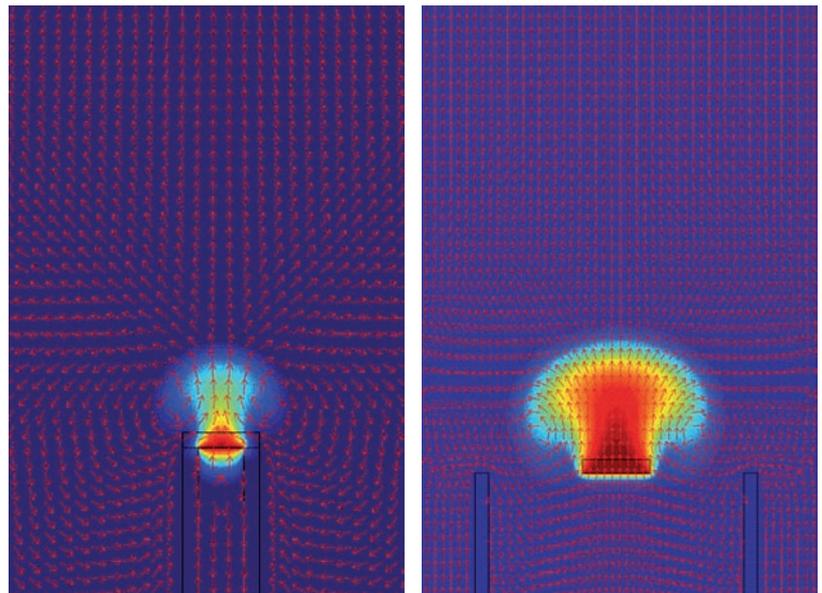


Bild 2:
Berechnung der Gasströmungen, verursacht durch elektrische Funken in Luft, bei unterschiedlicher Geometrie der Elektroden.
Links: 10 mm Elektrodenabstand, Strömung gestört,
Rechts: 40 mm Elektrodenabstand, ungestörte Strömung

6 Vorschlag zur Erweiterung der Norm EN 1839

Vor dem Hintergrund, dass in Regelwerken zur (indirekten) Charakterisierung schwer brennbarer Gase und Dämpfe die (untere) Explosionsgrenze(n) herangezogen (wird) werden, wurde das geeignete Prüfverfahren auf Grundlage der experimentellen Ergebnisse nach dem Kriterium ‚niedrigste untere Explosionsgrenze‘ ausgewählt.

Dieses Prüfverfahren ist als Annex 1 „Method for determination of the explosion limits of substances that are difficult to ignite“ zur EN 1839 vorgeschlagen worden. In diesem Annex 1 sind die folgenden zusätzlichen Anforderungen für die Bestimmung der Explosionsgrenzen von ‚schwer entzündbaren‘ Gasen und Dämpfen festgelegt worden:

- Zündgefäß: Senkrecht stehendes Glasrohr (80 mm/500 mm),
- Zündquelle: Hochspannungsfunken 15 KV/30 mA, Dauer 0,2 s,
- Elektrodengeometrie: Abstand der senkrechten Zuführungen min. 40 mm, Durchmesser der Elektroden nicht größer als 3 mm, Funkenstrecke 5 mm,
- Kriterium: Flammenausbreitung, zu beobachten mit einer Video-Kamera,
- Luftfeuchte: 50 % relative Luftfeuchte bei 23 °C für halogenierte Substanzen.

Alle anderen Parameter, sowie die Durchführung des Bestimmungsverfahrens für die Explosionsgrenzen entsprechen der bisherigen Norm.

Das modifizierte Bestimmungsverfahren kann auch für ‚normal‘ entzündbare Gase und Dämpfe angewendet werden, da orientierende Messungen zeigten, dass die vorgeschlagenen Modifikationen keine Auswirkungen auf deren Explosionsgrenzen haben.

Der Anhang ist im Zuge der Revision der Norm 2009 vorgeschlagen worden und liegt inzwischen auch in deutscher Fassung als Normentwurf prEN 1839:2010 [10] vor. Die Inkraftsetzung soll mit einer Übergangsfrist von einem Jahr erfolgen, um Prüfinstituten die Möglichkeit der Umrüstung ihrer Apparaturen zu geben.

Literatur

- [1] Richtlinie 2006/40/EG des europäischen Parlaments und des Rates vom 17. Mai 2006 über Emissionen aus Klimaanlage in Kraftfahrzeugen, Amtsblatt der Europäischen Union, L 161/12 vom 14.06.2006
- [2] DIN EN 378-1:2008: Kälteanlagen und Wärmepumpen – Sicherheitstechnische und umweltrelevante Anforderungen
- [3] ISO 817:2005: Refrigerants – Designation and safety classification
- [4] Globally Harmonized System of Classification and Labelling of Chemicals (GHS), Third revised edition, United Nations, 2009
- [5] Verordnung (EG) Nr. 1272/2008 über die Einstufung, Kennzeichnung und Verpackung von Stoffen und Gemischen (EU-GHS), Amtsblatt der Europäischen Union L 353/1 vom 31.12.2008
- [6] Technische Regeln für Betriebssicherheit TRBS 2152 Teil 1, Technische Regeln für Gefahrstoffe TRGS 721, 2006
- [7] ASTM E 681-09: Standard Test Method for Concentration Limits of Flammability of Chemicals (Vapors and Gases)
- [8] DIN EN 1839:2004: Bestimmung der Explosionsgrenzen von Gasen und Dämpfen. Deutsche Fassung EN 1839:2003
- [9] *Milde, J.:* Einfluss apparativer Parameter auf die Explosionsgrenzen schwer entzündbarer Gase und Dämpfe, Diplomarbeit Hochschule Zittau/Görlitz, 2009
- [10] prEN 1839:2009: Determination of explosion limits of gases and vapours, mit Annex1, Method for determination of the explosion limits of substances that are difficult to ignite
- [11] *Wilson, D. P., Richard, R. G.:* Determination of Refrigerant Lower Flammability Limits in Compliance with Proposed Addendum p to Standard 34. ASHRAE Transactions 2002, Vol. 108, Part 2, pp. 739–756. © 2002
- [12] COMSOL Multiphysics Modeling and Simulation Software, Comsol Multiphysics GmbH

Messung und Festlegung explosionsgefährdeter Bereiche – Erfahrungen aus praxisnahen Untersuchungen an Tankfahrzeugen für brennbare Flüssigkeiten

Hans Förster*

1 Einleitung

Im Hinblick auf die Weiterentwicklung von Regelungen zum Explosionsschutz an Gefahrgutfahrzeugen wurden an der PTB Umschlagvorgänge an Tankfahrzeugen für brennbare Flüssigkeiten untersucht. Diese Arbeiten – unterstützt vom Bundesministerium für Verkehr (BMVBS) und von industriellen Projektbegleitern – zielten u. a. darauf ab, belastbare Grundlagen für die Festlegung von explosionsgefährdeten Bereichen zu erhalten [1, 2, 3]. Nach der Betriebs-sicherheitsverordnung [4] muss der Anlagenbetreiber derartige Bereiche identifizieren und deren räumliche Ausdehnung sowie Häufigkeit und Dauer der Gefährdung einschätzen; gegebenenfalls sind dann Zonen festzulegen, in denen Explosionsschutz erforderlich ist. Für industrielle Standardsituationen sind in einschlägigen Regelwerken sicherheitstechnisch anerkannte Maßgaben zur Zonenfestlegung genannt, siehe z. B. [5, 6]. Die Daten hinsichtlich der räumlichen Ausdehnung beruhen teils auf Erfahrungswerten, teils auf kaum noch rekonstruierbaren Abschätzungen. Inwieweit es sich in allen Fällen um konservative Einschätzungen handelt, ist meist nicht belastbar zu beantworten.

Für den Bereich der Tankfahrzeuge und verbundener Anlagen wurden daher vor Ort oder im Prüffeld Konzentrationsverteilungen von freigesetzten Dampf/Luft-Gemischen vermessen, wobei neben betrieblichen auch störungsbedingte Freisetzungen betrachtet wurden.

Im Folgenden werden insbesondere diejenigen Ergebnisse herausgestellt, die von grundsätzlicher Bedeutung erscheinen und über den spezifischen Tankfahrzeugbetrieb hinausführen.

2 Grundlagen und praktische Randbedingungen für die experimentellen Untersuchungen

2.1 Stoffeigenschaften

Bei den in Frage kommenden brennbaren Flüssigkeiten wurde eine Flammpunkt-Spanne von ca. -40 °C (z. B. Ottokraftstoff) bis ca. 38 °C (z. B. Kerosin Jet A-1) untersucht; naturgemäß kommt den beiden beispielhaft genannten Stoffen we-

gen ihres großen Anteils am Gefahrgutaukommen besondere Aufmerksamkeit zu. Für systematische Messungen wurden aus technischen Gründen z. T. Dampf/Luft-Gemische geeigneter Ersatzstoffe eingesetzt, so z. B. Propan oder Pentan (für Ottokraftstoff) und Iso-Oktan (für Kerosin Jet A-1).

Mit zunehmendem Flammpunkt sinkt bei vergleichbaren atmosphärischen Bedingungen auch die Dampfkonzentration c_0 mit der das Dampf/Luft-Gemisch die Quelle verlässt. Typische Eckwerte der relevanten Spanne sind in Tabelle 1 wiedergegeben:

Tabelle 1:
Typische Eckwerte für den Flammpunkt, die Quellkonzentration c_0 und die Untere Explosionsgrenze c_{UEG}

Substanz	Flammpunkt in $^{\circ}\text{C}$	Quellkonzentration c_0 in Vol.-%	Untere Explosionsgrenze c_{UEG} in Vol.-%	Verdünnungsfaktor $F_v = c_0/c_{UEG}$
Ottokraftstoff	$\leq -40\text{ °C}$	$\geq 45\text{ *}$	0,6	75
Kerosin Jet A-1	$\geq 38\text{ °C}$	$\leq 2,0\text{ **}$	0,8	2,5

*) z. B. bei $38,5\text{ °C}$ (Reid-Dampfdruck)

**) z. B. bei der maximal für Gefahrguttransporte anzunehmenden Temperatur von 50 °C [1, 7].

In Tabelle 1 ist zusätzlich auch die Untere Explosionsgrenze c_{UEG} angeführt, die bei fast allen brennbaren Flüssigkeiten in einem Bereich von 0,6 Vol.-% bis ca. 1,5 Vol.-% liegt; ferner ist herausgestellt, um welchen Verdünnungsfaktor F_v die anfängliche Quellkonzentration gemindert werden muss, um im Verlauf des Dispersionsvorgangs schließlich c_{UEG} zu erreichen. Diese Konzentrationsminderung erfolgt nach der Freisetzung durch turbulente Lufteinmischung. Als explosionsgefährdeter Bereich ist die Konturfläche der Gemischwolke festzulegen, auf der gerade c_{UEG} erreicht wird.

2.2 Freisetzung und Dispersion

Der Schwerpunkt der Untersuchungen lag auf Situationen, in denen die Freisetzung der Gemische praktisch kontinuierlich aus einer räumlich begrenzten Quelle erfolgt. Typischerweise ist das der Fall, wenn die beim Umfüllen

* Dr. Hans Förster, ehem. Leiter der PTB-Arbeitsgruppe "Explosionsdynamik", hans.foerster44@t-online.de

verdrängten Dampf/Luft-Gemische entweder betrieblich aus Entlüftungseinrichtungen des befüllten Tanks freigesetzt werden oder störungsbedingt aus Leckagen entweichen. Entsprechend der Problemstellung ist mit typischen Durchmessern D der Freisetzungsoffnungen zwischen ca. 50 mm (z. B. Gaspendelleitung) und ca. 0,5 m (Domöffnung eines Tanks) zu rechnen.

Der Vorgang der Verdünnung der austretenden Gemische hängt im Wesentlichen von der Austrittsgeschwindigkeit v_0 der Gemische, von dem Durchmesser der Öffnung D , von den atmosphärischen Bedingungen – insbesondere der Luftgeschwindigkeit v_{atm} – sowie von der Dichtedifferenz der Gemische zu Luft ab. In Tabelle 2 sind für typische Laderaten und für die genannten Eckwerte der Durchmesser D die v_0 -Werte und die zugehörigen Reynoldszahlen (Luft) angegeben; offensichtlich strömen die Gemische in allen relevanten Fällen turbulent ($Re \geq 2300$) aus, so dass in jedem Fall unmittelbar nach dem Austritt eine turbulente Verdünnung mit der Umgebungsluft einsetzt.

Tabelle 2:
Typische Werte von Laderaten und Ausströmgeschwindigkeiten v_0 sowie von Reynolds-Zahlen Re der Gemische beim Umschlag an Tankfahrzeugen

Befüllter Tank	Laderate in m³/h	D = 0,08 m		D = 0,5 m	
		v_0 in m/s	Re	v_0 in m/s	Re
TKW, Chemieprodukt	50	3	15 700	0,07	2300
OK-TKW, 4 Ladearme; Lagertank	500	28	150 000	0,7	23 000
EKW	300	17	86 000	0,4	14 000
Flugzeugtank	180	10	52 000	-	-

Generell kann gesagt werden, dass die Verdünnung aufgrund atmosphärischer Luftbewegung umso geringer ausfällt, je geringer die Luftgeschwindigkeit v_{atm} ist. Für konservative Abschätzungen zur Gemischausbreitung gehen wir daher im Folgenden von einem minimalen Wert $v_{atm} = 0,5$ m/s (fast Windstille) aus.

Hinsichtlich des Dispersionsvorgangs sind in der Praxis bei Tankfahrzeugen die Fälle des Freistrahls, des Prallstrahls und der praktisch impulslosen atmosphärischen Dispersion relevant. Im Folgenden werden dazu bereits vorhandene Kenntnisse und hier maßgebliche Parameter angeführt.

2.2.1 Freistrah

Ist $v_0 > v_{atm}$, so bildet sich an der Öffnung ein Freistrah aus. Unter der Annahme $v_{atm} = 0,5$ m/s

ist dies nach Tabelle 2 **praktisch nur bei geringeren** Durchmessern ($D \approx 0,1$ m) der Fall. Für Abschätzungen ist dies bedeutsam, weil beim achsensymmetrischen Freistrah auf einige literaturbekannten Eigenschaften zurückgegriffen werden kann [8]. **So liegen für gegebenen Abstand** von der Quellöffnung die höchsten zeitlichen Mittelwerte der Konzentrationen c und der Geschwindigkeiten v auf der Freistrah-Achse (die für die weitere Diskussionen als x -Achse festgelegt wird) und für $c(x)$ und $v(x)$ gelten folgende einfachen Zusammenhängen:

$$\frac{c(x)}{c_0} = A \times \frac{D}{x} \tag{Formel 1}$$

$$\frac{v(x)}{v_0} = A \times \frac{D}{x} \tag{Formel 2}$$

Dies gilt jeweils nur für $x/D > A$, wobei in der Literatur ein Wert $A = 5$ genannt wird [8]. Die mittlere Geschwindigkeit $v(x)$ sinkt mit steigendem Abstand x . Solange $v(x) \geq v_{atm}$ bleibt, wird der Freistrah von der atmosphärischen Luftbewegung nur unerheblich gestört und man kann eine „atmosphärische“ Reichweite x_{atm} aus der Grenzbedingung $v(x_{atm}) = v_{atm}$ ableiten:

$$x_{atm} = A \times D \times \frac{v_0}{v_{atm}} \tag{Formel 3}$$

Für Werte $x \leq x_{atm}$ gelten also praktisch Freistrahbedingungen und es kann nach Formel 1 auch die mittlere Konzentration $c(x)$ auf der Strahlachse abgeschätzt werden. Die Reichweite x_{UEG} von – im zeitlichen Mittel – explosionsfähigen Konzentrationen kann aus der Bedingung $c(x_{UEG}) = c_{UEG}$ mit Hilfe von Formel 1 angegeben werden:

$$x_{UEG} = A \times D \times \frac{c_0}{c_{UEG}} \tag{Formel 4}$$

Für die Praxis ist das nur gültig, solange beim Quellabstand x_{UEG} noch von einem Freistrah gesprochen werden kann, also wenn $x_{UEG} \leq x_{atm}$.

Tabelle 3 gibt beispielhaft einen Überblick, inwieweit diese Bedingung für die Leitsubstanzen Ottokraftstoff und Kerosin bei $v_{atm} = 0,5$ m/s zutrifft.

Tabelle 3:
Beispielhafte Werte für x_{atm} und x_{UEG} für $D = 0,08$ m, $v_0 = 10$ m/s und $v_{atm} = 0,5$ m/s (Parameter $A = 5$)

Verdünnungsfaktor	x_{atm} in m	x_{UEG} in m
$F_v = 75$ (Ottokraftstoff)	8,0	30
$F_v = 2,5$ (Kerosin)	8,0	1,0

Ersichtlich gilt $x_{\text{UEG}} \leq x_{\text{atm}}$ nur bei relativ geringen Verdünnungsfaktoren bis ca. $F_v \approx 5$; das eröffnet aber immerhin die Möglichkeit, x_{UEG} bei Stoffen mit relativ geringem Dampfdruck – wie z. B. Kerosin – einfach und verlässlich abzuschätzen. Anzumerken ist hier auch, dass für diese geringen Brennstoffkonzentrationen die Dichtedifferenzen der Gemische zu Luft vernachlässigbar bleiben. In der Tat sind deutliche Überschreitungen von c_{UEG} auch nur bei erwärmten Gemischen (beispielsweise 50 °C bei Kerosin) zu erwarten, so dass die Temperaturdifferenzen tendenziell die vorgenannten geringen Dichtedifferenzen kompensieren.

2.2.2 Prallstrahl

In der Praxis sind die Öffnungen der Entlüftungseinrichtungen aus Gründen des Weterschutzes häufig nach unten gerichtet; das Gemisch wird dabei nach Laufwegen von wenigen Durchmessern D (senkrecht) auf die meist horizontale Tankwand gelenkt. Ist der Abstand h zwischen Quellöffnung und Wand kleiner als x_{atm} , so resultiert nach dem Aufprall des Freistrahls auf die Wand ein kreisförmiger Wandstrahl. Die Geometrie und die wesentlichen Abmessungen bei einem solchen Prallstrahl sind in Bild 1 beispielhaft für die häufig verwendete sogenannte „Schwanenhals-Konfiguration“ skizziert. Einfache empirische Zusammenhänge für die Geschwindigkeit und die Konzentration im Bereich des Wandstrahls (vergl. Bild 1) sind – soweit bekannt – in der Literatur nicht verfügbar.

2.2.3 Atmosphärische Dispersion

Ist $v_0 < v_{\text{atm}}$, so verhindert die atmosphärische Luftbewegung die Ausbildung eines Freistrahls. Die Ausströmung erscheint praktisch impulslos und die Dispersion ist – u. U. durch Auftriebskräfte – stets aber durch die Turbulenz der Atmosphäre geprägt. Für die plausible Annahme von $v_{\text{atm}} = 0,5$ m/s zeigt die Tabelle 2, dass mit dieser Situation immer bei größeren Durchmessern (z. B. $D \approx 0,5$ m) der Quellöffnung zu rechnen ist. Für diese Art der Verdünnung gibt es – soweit bekannt – keine einfachen empirischen Ansätze für die Konzentrationen im relativ quellnahen Abstandsbereich bis ca. $100D$. In der Tat werden hier komplexere Modellrechnungen herangezogen, um die atmosphärische Dispersion der meist schweren Gase zu prognostizieren. Eine Übersicht über gängige Rechenmodelle findet man z. B. in [9, 10], Probleme im Zusammenhang mit der Auswertung und Modellierung von Messergebnissen sind z. B. in [11] eingehend diskutiert.

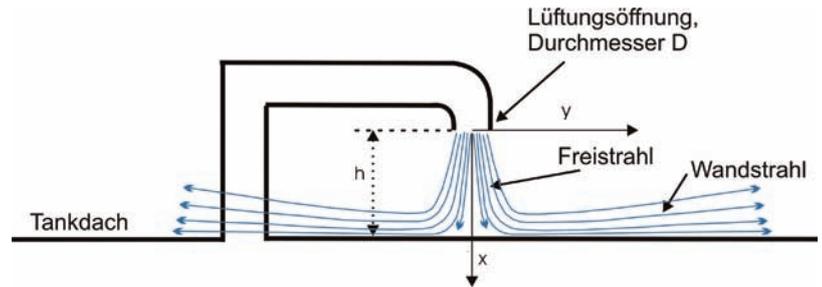


Bild 1:
Typische Freisetzungsgometrie in der Praxis bei einem Prallstrahl

3 Messungen

3.1 Gassensoren

Zur Vermessung der Konzentrationsfelder standen sechs Infrarot-Sensoren zur Verfügung, die jeweils für die aktuellen Dampf/Luft-Gemische kalibriert wurden. Die Sensoren haben einen typischen Messbereich von 0,01 Vol.-% bis 1,8 Vol.-% bei einer gerätespezifischen Messunsicherheit von typisch $\pm 0,1$ Vol.-%. Die Ansprechzeit ist $t_{90} = 10$ sec bei einer Luftgeschwindigkeit von $v_{\text{atm}} \geq 0,5$ m/s. Das empfindliche Sensorvolumen hat eine Längendimension von 50 mm. Bei den Messungen im Freien zeichnete ein Anemometer Windrichtung und Windgeschwindigkeit kontinuierlich auf.

3.2 Konzentrationsverlauf als Funktion der Zeit – Maximalwerte

Generell wurde bei festem Messabstand x von der Quelle aus den zeitabhängigen Konzentrationswerten $c(t; x)$ für das jeweilige zeitliche Messintervall der Maximalwert $c_{\text{max}}(x)$, der Mittelwert $c_{\text{mean}}(x)$ und z. B. noch der 95-Perzentilwert $c_{95}(x)$ ermittelt.

Bild 2 zeigt beispielhaft zeitliche Verläufe von $c(t; x)$ auf der Strahlachse für $x = 0,2$ m und $x = 2,0$ m mit den o. g. zugehörigen statistischen Kennwerten. Die stochastischen Konzentrationschwankungen sind durch die Strahlerturbulenz verursacht.

Das Ergebnis ist typisch für vergleichbare Messungen und zeigt folgende generelle Charakteristika: Im quellnahen Bereich ($x/D \approx 5$; $F_v \approx 1,5$) weichen die statistischen Kennwerte maximal um nur ca. 10 % untereinander ab. Im quellferneren Bereich ($x/D \approx 50$; $F_v \approx 10$) kann dagegen der Maximalwert den 95-Perzentil-Wert um den Faktor 2 und den Mittelwert gar um den Faktor 10 und mehr übertreffen.

Hinsichtlich der Unsicherheit der Kennwerte c_{max} , c_{95} und c_{mean} ist zu bemerken, dass die Häufigkeitsverteilung der Konzentrationswerte nur im quellnahen Bereich in etwa symmetrisch ist und Variationskoeffizienten daher nur für diesen Bereich sinnvoll sind und etwa 0,03 bis 0,1 betragen. Im quellferneren Bereich und bei stärkeren Verdünnungen sind die Häufigkeitsvertei-

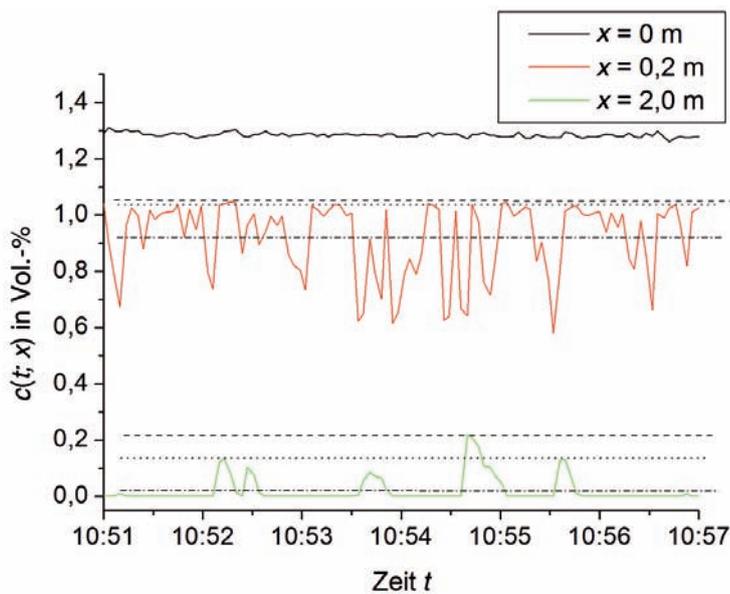


Bild 2:

Zeitlicher Verlauf der Konzentration von Iso-Okтан auf der Achse eines runden Freistrahls für drei verschiedene Abstände x von der Quellöffnung; $c_0 = 1,3$ Vol.-% ($x = 0$ m); $c_{UEG} = 1,0$ Vol.-%; $D = 0,05$ m; $v_0 = 3,4$ m/s; $v_{atm} \leq 0,2$ m/s.

Statistische Kennwerte im Messintervall für $x = 0,2$ m und $x = 2,0$ m sind durch Linien markiert: Maximum gestrichelt, 95-Perzentil punktiert, Mittelwert strichpunkt.

lungen sehr viel komplexer. Diese Problematik ist in einem umfangreichen und grundlegenden Projekt der EU untersucht worden [11]. Dabei wurden – auf der Grundlage vergleichsweise sehr großer Datensätze – Modellfunktionen der Wahrscheinlichkeitsdichteverteilung insbesondere jeweils für den Randbereich der hohen Konzentrationswerte getestet. Die besten Übereinstimmungen scheinen dabei Modellverteilungen zu liefern, die bei einem endlichen maximalen Wert (c_{max}) zu Null abfallen (z. B. eine generalisierte Pareto-Verteilung). Die für derartige Untersuchungen erforderlichen umfangreichen Datensätze konnten im Rahmen der hier vorgestellten Projekte nicht bereitgestellt werden. Hinsichtlich der Schwankungsbreite der c_{max} -Werte sei deshalb auf die zusammenfassende Darstellung der relevanten Messungen in Bild 5 verwiesen, die bis zu einer Verdünnung $F_v = 5$ eine Streuung von maximal 10 % nahelegt. Für die Ausdehnung des explosionsgefährdeten Bereichs ist maßgeblich, bis zu welchem Abstand x die zu erwartenden **maximalen Konzentrationen $c_{max}(x)$ die untere Explosionsgrenze c_{UEG} überschreiten können**. Bei der weiteren Diskussion wird daher praktisch nur auf die ermittelten c_{max} -Werte Bezug genommen.

Im Hinblick auf Simulationsrechnungen zu Konzentrationsverteilungen machen die vorgestellten Messergebnisse exemplarisch deutlich, dass selbst aufwendige Simulationen nicht zielführend sind, wenn sie – wie häufig – nur die

(langzeitigen) Mittelwerte der Konzentration liefern, beim konkreten Problem aber das Unterschreiten der UEG in einem Quellabstand stattfindet, bei dem die Verdünnung schon relativ hoch ist und sich c_{max} und c_{mean} dementsprechend schon signifikant unterscheiden. Die hier dargestellten Aspekte gelten nicht nur für das diskutierte Beispiel der Freistrahbedingungen sondern gleichermaßen auch für Prallstrahlen und für den Fall der atmosphärischen Dispersion.

3.3 Konzentrationsmesswerte und Zündversuche

Aus der Diskussion der Bedeutung der c_{max} -Werte ergibt sich ein weiterer genereller Gesichtspunkt für die Abschätzung explosionsgefährdeter Bereiche: Ein gemessener Maximalwert fällt u. U. wegen der apparativ bedingten zeitlichen und räumlichen Mittelung im Sensor kleiner aus, als bei idealer Auflösung. Im Dispersionsfeld kann demnach der Grenzwert c_{UEG} tatsächlich in größerem Abstand von der Quelle auftreten, als es die apparativ mittelnde Messung ausweist – ein aus den Messungen abgeleiteter explosionsgefährdeter Bereich ist dann u. U. nicht konservativ.

Zur Klärung dieser Problematik wurden stichprobenartig bei einer Messreihe neben den Konzentrationsmessungen gleichzeitig Zündversuche durchgeführt, um die Relevanz der hier gemessenen Konzentrationswerte für tatsächliche Rückzündungen zu bewerten. Die Versuchsbedingungen stellten beispielhaft die Atmung aus einem Tankwagen bei atmosphärischer Erwärmung nach; Bild 3 zeigt ein Foto des Aufbaus mit erfolgreicher Rückzündung.

Für den Versuch wurden die IR-Sensoren kreisförmig auf verschiedenen Radien R um die Quelle angeordnet. Die Zündquelle wurde der Quellöffnung – möglichst von Leerichtung – radial bis zu einem Abstand von ca. 0,5 m genähert. Der größte Abstand bei dem im Beispiel Zündungen festgestellt wurden betrug ca. 1,5 m. In Bild 4 sind für diesen Versuch und für die in Bild 3 wiedergegebenen Sensorpositionen auf dem Kreis mit $R = 1,5$ m der zeitliche Verlauf der Konzentrationen sowie Markierungen für den Zeitpunkt erfolgreicher Zündungen dargestellt. Evident erreichen die gemessenen c_{max} -Werte im Verlauf des Versuchs wiederholt knapp die UEG.

Im Ergebnis zeigen also diese stichprobenartigen Messungen, dass mit den hier verfügbaren IR-Sensoren weitgehend die gleiche Reichweite der explosionsfähigen Gemische ermittelt wird, wie sie sich direkt aus den Rückzündversuchen ergibt. Zu bedenken ist dabei, dass die IR-Sensoren den räumlichen Mittelwert über ihr empfindliches Volumen anzeigen, während der Brenner u. U. schon beim Erreichen der UEG in

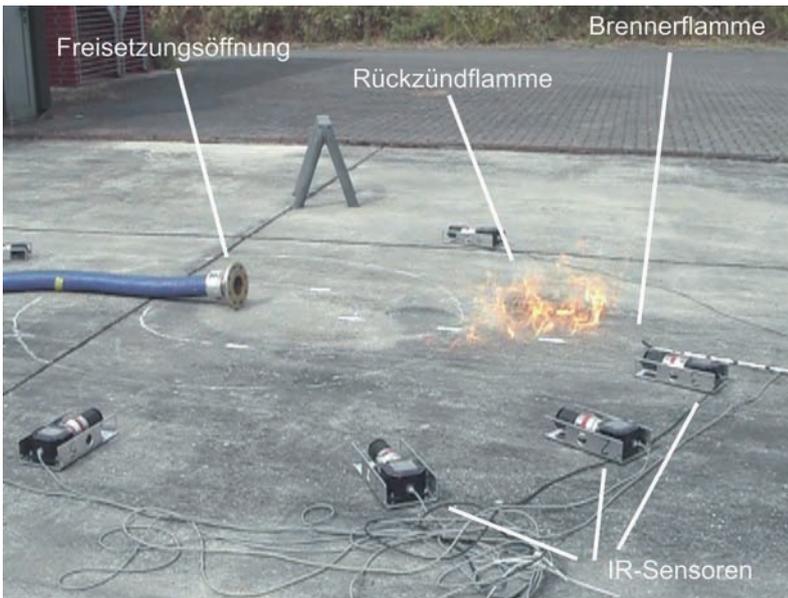


Bild 3: Atmosphärische Dispersion von n-Pentan nach Austritt aus einem Gaspendelschlauch – Foto vom Versuchsaufbau bei Rückzündung. Zündquelle: Brennerlanze mit Propanflamme von ca. 0,05 m Länge

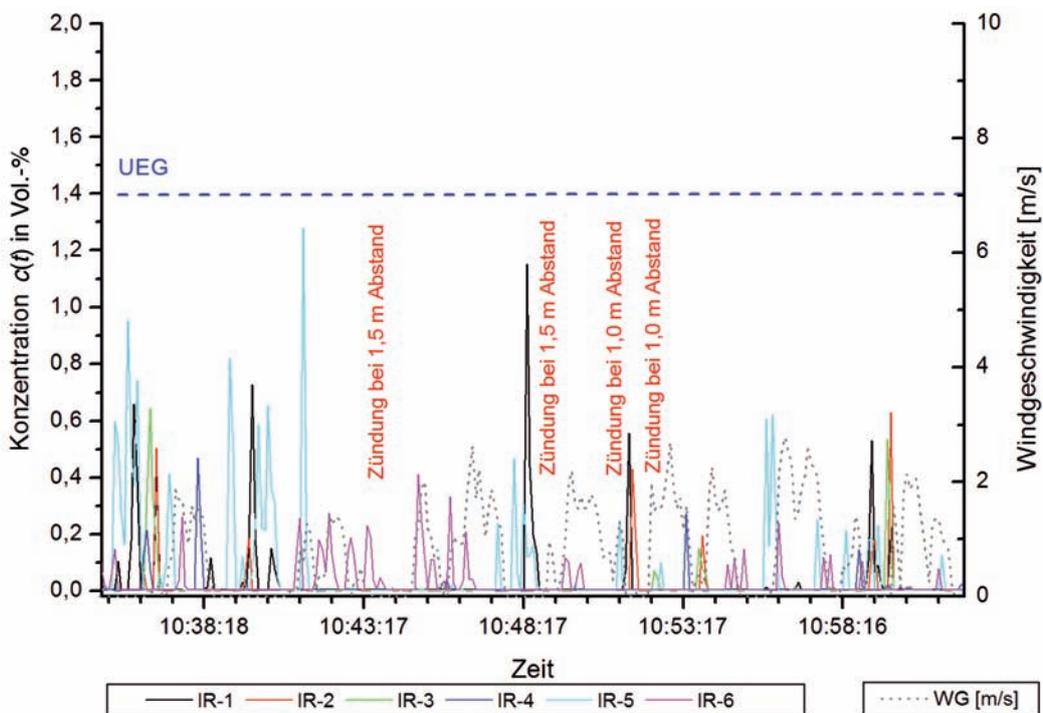


Bild 4: Atmosphärische Dispersion von n-Pentan – Konzentrationsverlauf bei dem Versuchsaufbau gemäß Bild 3. Versuchsbedingungen: $c_{UEG} = 1,4$ Vol.-%; $c_0 = 30$ Vol.-% ($F_v = 21$); $D = 50$ mm; $v_0 = 0,5$ m/s; $v_{atm} = 1,5$ m/s.

einem Teilvolumen seiner Flamme eine Rückzündung einleitet. Die Übereinstimmung der Reichweiten aus beiden Methoden spricht dafür, dass die relevanten c_{max} -Werte in Turbulenzballen transportiert werden, deren Ausdehnung vergleichbar oder größer als diejenige der Probe-mittel (Flamme, IR-Sensor) ist.

Im Übrigen zeigt die Ausdehnung und Form der zurücklaufenden Flamme, dass sich das Gemisch von der Quelle jeweils in einer relativ schmalen Fahne (Breite bei $R = 1,5$ m ca. 0,4 m) mit der gerade vorliegenden Windrichtung ausbreitet.

3.4 Konzentrationsverlauf als Funktion des Abstands von der Quellöffnung für Freistrahlfbedingungen

Um zu überprüfen, ob für die hier maßgeblichen Maximalwerte $c_{max}(x)$ ähnlich einfache Relationen gelten, wie für die oben diskutierten zeitliche Mittelwerte, wurden für relevante Werte von D , v_0 und c_0 entsprechende Messungen an Freistrahlen durchgeführt. In Bild 5 sind beispielhaft die Ergebnisse aus einigen Messreihen dargestellt.

Als wesentliches Ergebnis aus allen – auch hier nicht wiedergegebenen – Versuchen ist Folgendes hervorzuheben: Die normierten Konzentrationen $c_{max}(x)/c_0$ hängen nur vom normierten Abstand x/D ab; im Bereich $5 \leq x/D \leq 40$ lässt

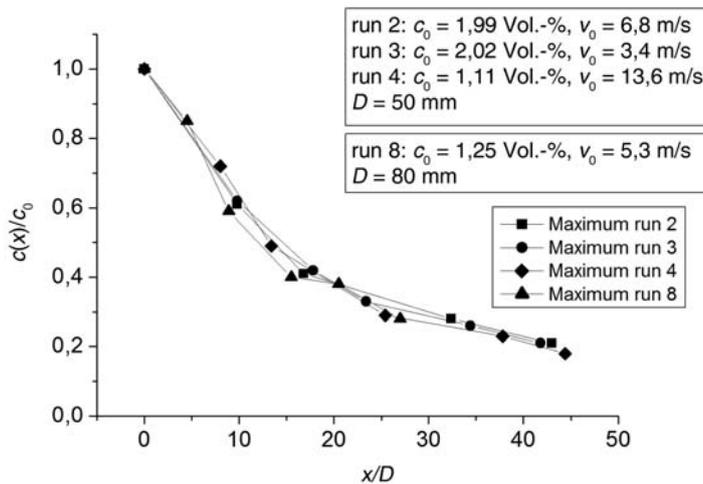


Bild 5: Maximalwerte der Konzentration im Freistrahlfür unterschiedliche Austrittsgeschwindigkeiten v_0 und Durchmesser D der Austrittsöffnungen. Iso-Oktan/Luft-Gemische; $v_{\text{atm}} \leq 0,2$ m/s.

sich der Verlauf von $c_{\text{max}}(x)$ für konservative Abschätzungen durch eine Beziehung ähnlich zu Formel 1 mit $A = 7,5$ wiedergeben:

$$\frac{c_{\text{max}}(x)}{c_0} = A \times \frac{D}{x} \quad \text{Formel 5}$$

Mit Formel 5 kann also unter Verwendung von $A = 7,5$ aus der Bedingung $c_{\text{max}}(x_{\text{UEG, max}}) = c_{\text{UEG}}$ die Reichweite $x_{\text{UEG, max}}$ abgeschätzt werden, bei der die zu erwartenden Maximalwerte der Konzentration noch c_{UEG} erreichen.

Wegen der Einschränkung $x/D \leq 40$ bleibt die Anwendung auf Freistrahlen beschränkt, bei denen für die Verdünnung $F_v \leq 5$ gilt. Im Rahmen der o. g. Projekte sind diese Relationen z. B. für das Gefahrgut Kerosin angewendet und hinsichtlich der dort spezifischen Konsequenzen für die Praxis ausgewertet worden. Anhand der generellen, hier aufgezeigten Rahmenbedingungen zur Gültigkeit sind Anwendungen bei anderen Gefahrgütern mit vergleichbar geringem Dampfdruck möglich und naheliegend.

3.5 Konzentrationsverlauf als Funktion des Abstands von der Quellöffnung für Prallstrahlen

Prallstrahlen wurden eingehend für die Lüftungsbedingungen bei Flugfeld-Tankfahrzeugen für Kerosin untersucht. In der Praxis lagen dabei folgende Randbedingungen vor: $D = 0,05$ m; $h = 0,05$ m (vergl. Bild 1); $4 \text{ m/s} \leq v_0 \leq 8 \text{ m/s}$.

Die Vor-Ort-Versuche fanden auf den Flughäfen von Hannover, Palma de Mallorca und Abu Dhabi statt; damit wurde eine Spanne von Anfangskonzentrationen ($0,25 \text{ Vol.-%} \leq c_0 \leq 0,96 \text{ Vol.-%}$, bedingt durch die jeweilige Temperatur des Kerosins) und von Windgeschwindigkeiten ($0,5 \text{ m/s} \leq v_{\text{atm}} \leq 5 \text{ m/s}$) überdeckt. Um c_0 und v_0 gezielt einstellen zu können und um praktisch Windstille ($v_{\text{atm}} \approx 0,2 \text{ m/s}$) zu realisieren, wurde eine weitere

Untersuchungsreihe in einer Versuchshalle an einem 1:1-Modellaufbau durchgeführt.

Bild 6 zeigt von allen diesen Messungen die innerhalb der jeweiligen Messzeit ermittelten und auf c_0 bezogenen Konzentrationsmaxima für verschiedene seitliche Abstände von der Quellöffnung (zur Geometrie siehe Bild 1). Erwartungsgemäß sind bei $x = h$, also direkt auf dem Tankdach, die höchsten Konzentrationswerte im Wandstrahl zu finden; für konservative Betrachtungen sind daher nur die Daten für diese Position der Messsonden herangezogen worden.

Ersichtlich liegen bei allen Messungen mit senkrechtem Aufprall die Konzentrationswerte innerhalb eines engen Bandes (Die Ergebnisse aus Palma weichen davon ab, weil dort der Freisetzungstrahl nicht senkrecht, sondern unter 45° auf das Tankdach geleitet wurde). Für die relevanten Parameterbereiche sind die maximalen Konzentrationen c_{max} proportional zu c_0 und weitgehend unabhängig von v_0 und v_{atm} . Für die Konzentrationen einerseits im Wandstrahl direkt an der Wand und andererseits im Freistrahlfür die Achse gelten also qualitativ die gleichen Relationen. Erste Modellrechnungen zu c_{mean} -Werten liefern eine gute Übereinstimmung mit den Messergebnissen hinsichtlich der funktionalen Abhängigkeit vom Abstand y (siehe [12]). Eine systematische Untersuchung des Einflusses der Parameter D und h konnte im Rahmen der hier dargestellten Untersuchungen nicht geleistet werden. Die bisherigen Ergebnisse sprechen aber dafür, dass aus weiteren Messdaten – in Kombination mit CFD-Rechnungen – ebenso einfache empirische Beziehungen abzuleiten sind, wie für den Freistrahlfür. Ein entsprechendes zukünftiges Untersuchungsprogramm erscheint auch deshalb lohnend, weil bei Entlüftungsöffnungen in der Praxis sehr häufig die Prallstrahlgeometrie vorliegt.

3.6 Konzentrationsverlauf bei atmosphärischer Dispersion

Die vorangehenden Ausführungen zur Freistrahlfür- und Prallstrahldispersion gelten – wie oben dargestellt – überwiegend für Stoffe, die aufgrund ihres Dampfdrucks nur eine vergleichsweise geringe Anfangskonzentration aufweisen und entsprechend geringe Verdünnungen $F_v \leq 5$ erfordern. Bei Substanzen mit vergleichsweise höheren Satttdampfkonzentrationen ($c_0 \geq 15 \text{ Vol.-%}$) sind auch wesentlich höhere Verdünnungen erforderlich, um die UEG zu erreichen; die entscheidende Dispersionsphase liegt dann praktisch immer im Bereich der atmosphärischen Dispersion.

Die vorliegenden Untersuchungen mussten sich hinsichtlich dieser Randbedingung der atmosphärischen Dispersion auf praxisnahe und sicherheitstechnisch besonders kritische Situa-

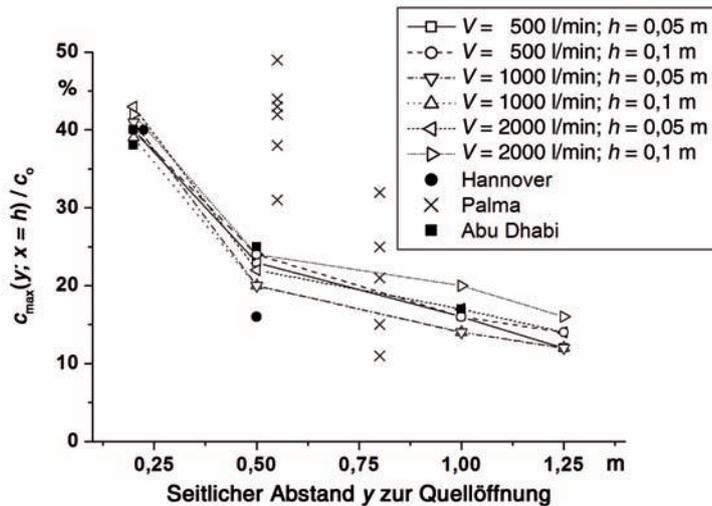


Bild 6:
Maximale Konzentrationen in Prallstrahlen auf der Prallfläche ($x = h$; Geometrie siehe Bild 1) als Funktion des seitlichen Abstands y von der Quellöffnung, bezogen auf die Quellkonzentration c_0 .

onen beschränken. Die Versuche zielten darauf ab, für die in Frage stehenden Umfülltechniken eine konservative Abschätzung explosionsgefährdeter Bereiche zu ermöglichen. Die ermittelten experimentellen Datensätze erscheinen geeignet – zumindest stichprobenartig – prognostische Methoden zu bewerten. Aufgrund der obigen Diskussion der c_{\max} -Werte ist aber absehbar, dass nur eine explizite Berücksichtigung der turbulenten Schwankungen zu tragfähigen Modellen führen kann.

4 Zeitweise explosionsgefährdete Bereiche

Im Rahmen der Konzentrationsmessungen vor Ort ist immer wieder deutlich geworden, dass explosionsgefährdete Bereiche häufig nur während ganz bestimmter betrieblicher Arbeitsschritte auftreten. Beim Betrieb von Tankfahrzeugen treten derartige Situationen gerade beim Umfüllen der Ladung auf; beispielhaft seien folgende Vorgänge genannt:

- Beim Befüllen über den offenen Dom – etwa für Ethanol noch praktiziert – tritt explosionsfähige Atmosphäre (nur) für die Dauer des Befüllvorgangs im Dombereich auf.
- An Tankfahrzeugen für Chemieproukte wird die vorliegende Tankatmosphäre häufig vor dem Befüllen über eine gesonderte Einrichtung manuell entspannt und führt dann in der Umgebung dieser Einrichtung kurzzeitig zu explosionsgefährdeten Bereichen.
- Bei Gaspendelsystemen sind die Kuppelungssysteme überwiegend nicht beidseitig selbstschließend, so dass für die Phasen des Anschlusses und der Trennung mit der Freisetzung von explosionsfähigen Gemischen gerechnet werden muss.

In den eingeführten Regelungen zum Explosionsschutz wird derartigen zeitlichen Begrenzungen der Explosionsgefahr zum Teil Rechnung getragen. So ist z. B. in der TRbF 30

„Füllstellen“ [6] unter 5.4.2, (1) bestimmt: *Beim Befüllen von Transportbehältern (Tanks auf Fahrzeugen und Eisenbahnkesselwagen, Tankcontainer) ist der Bereich bis zu einem Abstand von 1 m um die Konturen der Tanks Zone 1. Die Zone 1 soll also „temporär“ nur für die Phase des Befüllens gelten.*

In diesem Zusammenhang sei daran erinnert, dass die Zonenzuweisung lediglich eine Hilfe für den Betreiber ist, um den tatsächlichen Schutz zu ergreifen, nämlich geeignete explosionsgeschützte Betriebsmittel auszuwählen und einzusetzen. Dabei ist die Häufigkeit des Auftretens explosionsfähiger Atmosphäre (dauernd, gelegentlich, selten) zu bewerten. Eine Kenntnis darüber oder ein Bezug dazu, wann das Ereignis genau eintritt, ist dabei nicht unterstellt; im Gegenteil: weil der Zeitpunkt nicht bekannt ist, müssen die Schutzmaßnahmen permanent wirksam sein. Die zugehörige, den Schutz veranlassende Zonenzuweisung kann daher auch nicht zeitlich beschränkt werden. Die „temporäre“ Zone widerspricht also dem landläufigen Konzept, wonach eine Zone als permanent anzusehen ist.

Ist dagegen – wie bei den oben genannten drei Beispielen – der Zeitpunkt und die Dauer des Auftretens explosionsfähiger Atmosphäre genau bekannt, so ist ausreichender Schutz auch gewährleistet, wenn lediglich für diese bekannte Zeitphase im betroffenen Bereich ausreichend explosionsgeschützte Geräte betrieben werden. Diese Maßgabe stellt oft keine besondere Beschwerne dar: z. B. wird der nicht-explosionsgeschützte Fahrmotor eines TKW beim Befüllen meist so und so nicht betrieben.

Sind also Betriebsvorgänge, die zu explosionsgefährdeten Bereichen führen können, zeitlich hinsichtlich Eintritt und Dauer genau bekannt, so erscheint es logisch und angemessen, nur für den entsprechenden zeitlichen (und räumlichen) Bereich den Betrieb auf geeignet ge-

geschützte Geräte einzuschränken. **Das Hilfsmittel „Zonenzuweisung“ kann dabei ohne Verlust an Sicherheit entfallen.**

Auch für diese Fälle bleibt natürlich eine Zonenzuweisung – mit permanenten Schutzmaßnahmen – eine mögliche, aber wesentlich stringenter Option. Der Vergleich des Konzepts „permanente Schutzanforderungen“ mit demjenigen der „zeitweisen Schutzanforderungen“ macht zudem klar, dass sich das Schutzniveau der (in Betrieb verbleibenden) Geräte auch bei letzterem Verfahren nach den o. g. Schlüsselworten zur Häufigkeit der Explosionsgefahr und den damit verbundenen bekannten Gerätekategorien richten muss.

Das Konzept der „zeitweisen Schutzanforderungen“ erfordert vom Betreiber allerdings nicht nur die Festlegung und Auswahl geschützter Geräte sondern auch die Einhaltung eines zeitweiligen Betriebsverbots für nicht ausreichend geschützte Betriebsmittel. Dieser zusätzliche betriebliche Aspekt birgt gegenüber dem permanenten Schutz (aus einer Zonenzuweisung) zusätzliche Fehlermöglichkeiten. **Um ein vergleichbares Sicherheitsniveau zu realisieren, sind also klare zugehörige betriebliche Regelungen erforderlich, die von den Beteiligten strikt einzuhalten sind.**

In der Praxis hat sich das Konzept der „zeitweisen Schutzanforderungen“ gerade im Zusammenhang mit der Befüllung von Transporttanks als unverzichtbar erwiesen, wobei es in den einschlägigen Regelungen nicht einheitlich umschrieben wird:

- In den deutschen TRbF werden – wie am Beispiel der TRbF 30 gezeigt - implizit temporäre Zonen eingeführt.
- Nach der österreichischen „Verordnung explosionsfähige Atmosphären – VEXAT“ [13], §12, (2) und (3), kann „für die Dauer bestimmter Arbeiten eine temporäre Ausstufung oder Umstufung (Anmerkung: der Zonen) erfolgen“.
- Im technischen Report der Europäischen Normungsorganisation CEN [14] „Leitlinien und Empfehlungen für Befüllung, Beförderung und Entladung“, Anhang E, wird klargestellt, dass Bereiche mit Explosionsgefahr nur während des Beladens bestehen; eine Zonenzuweisung erfolgt dabei ausdrücklich nicht.
- Im Europäischen Übereinkommen über die internationale Beförderung gefährlicher Güter auf der Straße (ADR) [7] wird unter 9.2.2.5.1 a) bestimmt: „Die Teile der elektrischen Anlage, einschließlich der Leitungen, die unter Spannung bleiben müssen, wenn der Batterietrennschalter geöffnet ist, müssen zur Verwendung innerhalb einer Gefahrenzone geeignet sein.“ Zu diesem gerätetechnischen Ansatz fehlt im ADR aber die unabdingbar zugehörige **Betriebsvorschrift, wann der Batterieschalter zu öffnen**

ist. Die oben zitierte Maßgabe im ADR ist damit sicherheitstechnisch wirkungslos und kann – bei Verkennung dieses Sachverhalts – sogar zu gefährlichen Fehleinschätzungen führen.

Für die Weiterentwicklung der Regelungen zum Explosionsschutz ergeben sich aus jetziger Sicht folgende Aspekte: Ein nur zeitweiser Explosionsschutz in Bereichen mit betrieblich bedingter, zeitweiser Explosionsgefahr ist ein in der Praxis geübtes und teilweise unverzichtbares Verfahren. In der derzeitigen Regelsetzung ist das Konzept im Prinzip eingeführt aber überwiegend nicht klar genug vom Konzept des permanenten Explosionsschutzes mit Zonenzuweisung abgesetzt. Das mag dadurch bedingt sein, dass die Betriebssicherheitsverordnung [4] in § 5, (1) fordert „Der Arbeitgeber ... (hat) ... explosionsgefährdete Bereiche in Zonen einzuteilen“. Entgegen der Praxis und der Erfahrung wird dem Betreiber also nur ein permanenter Explosionsschutz mit Zonenzuweisung als verordnungskonform vorgegeben. Unter diesen Aspekten erscheint es wünschenswert, dass in den relevanten Regeln das Konzept des zeitweisen Explosionsschutzes begrifflich von der (permanenten) Zonenzuweisung abgesetzt wird und dass dabei die Unabdingbarkeit begleitender betrieblicher Vorschriften klar herausgestellt wird.

5 Zusammenfassung

An Tankfahrzeugen für brennbare Flüssigkeiten und an damit verbundenen Anlagen treten explosionsgefährdete Bereiche auf. Die hier in Bezug genommenen experimentellen Untersuchungen haben konkrete Daten insbesondere zur Ausdehnung dieser Bereiche für relevante kritische Situationen in der Praxis geliefert [1, 2, 3, 12]. Der vorliegende Beitrag wendet sich schwerpunktmäßig Ergebnissen und verbliebenen Fragen zu, die auch für andere technische Bereiche und für zukünftige Untersuchungen bedeutsam erscheinen:

Die Erfassung der Gefahrenbereiche durch Konzentrationsmessungen zeigt, dass die für Rückzündungen relevanten örtlichen Maximalwerte c_{\max} der Konzentration im turbulenten Dispersionsfeld um Größenordnungen über den zugehörigen zeitlichen Mittelwerten c_{mean} liegen können (ausgedehnte Phasen mit Konzentrationswert Null). Statistisch abgesicherte Aussagen über c_{\max} erfordern validierte mathematische Modelle für die komplexen Häufigkeitsverteilungen und wesentlich umfangreichere Datensätze (lange Messzeiten unter konstanten Bedingungen), als sie in den vorliegenden praxisnahen Untersuchungen gewonnen werden konnten. In parallel zu den Konzentrationsmessungen durchgeführten Rückzündversuchen konnte – zumindest stichprobenweise – die Relevanz der hier

ermittelten c_{\max} -Messwerte belegt werden. Im Übrigen wird klar, dass Simulationsrechnungen, die für den Fall einer stationären Freisetzung nur zeitliche (Konzentrations-)Mittelwerte liefern, für dieses Problem des Explosionsschutzes nicht zielführend sind.

Bei Freisetzungen von Gemischen mit geringem Dampfanteil (z. B. Kerosin) genügt es in der Praxis oft, einen nahezu ungestörten Freistrahler oder Prallstrahl zu betrachten. Für Verdünnungsfaktoren $F_v \leq 5$ erweisen sich dann die Konzentrationen im maßgeblichen Dispersionsfeld ($c \leq c_{\text{UEG}}$) als proportional zur Quellkonzentration c_0 und als unabhängig von der Auströmgeschwindigkeit v_0 . Für Freistrahler führen die Messungen auf eine einfache empirische Relation für c_{\max} , die es erlaubt, die maximale Ausdehnung explosionsgefährdeter Bereiche anzugeben. Bei Prallstrahlern lassen die bisherigen Daten ähnlich einfache empirische Relationen erwarten; dies wäre durch weitere Messungen quantitativ zu unterlegen.

Die Konzentrationsmessungen in der Praxis belegen, dass Bereiche mit Explosionsgefahr im wesentlichen nur beim Umfüllen auftreten. Auch in anderen technischen Bereichen ist für derartige Situationen mit betrieblich bedingter, zeitweiser Explosionsgefahr ein nur zeitweiser Explosionsschutz ausreichend und manchmal sogar in der Praxis unverzichtbar. Bei diesem Schutzkonzept sind Zonenfestlegungen entbehrlich, allerdings sind neben den gerätetechnischen Maßnahmen klare betriebliche Anweisungen unabdingbar. Um Fehleinschätzungen zu vermeiden, sollte dieses z. T. schon lange verwendete Konzept auch in den Regelungen benannt und dort vom Konzept des permanenten Explosionsschutzes (mit Zonenzuweisung) abgesetzt werden.

Literaturverzeichnis

- [1] Förster, H., Günther, W.: PTB-Bericht: Untersuchungen zur Bildung und Ausbreitung explosionsfähiger Gemische beim Befüllen und Entleeren von Flugtankwagen mit Kerosin (Jet A-1). Braunschweig, 2007
- [2] Förster, H.: PTB-Bericht PTB-Ex-2, Untersuchung zur Explosionsgefährdung beim Umschlag von Kerosin (Jet A1) an Tanklagern und beim Tanken an Flugzeugen. Bremerhaven : Wirtschaftsverlag NW, Verlag für neue Wissenschaft GmbH, 2008
- [3] Förster, H., Günther, W.: Explosion protection for vehicles intended for the transport of flammable gases and liquids – An investigation into technical and operational basics. *Journal of Hazardous Materials*, Volume 164, Issues 2–3. 30. May 2009, S. 1064–1073
- [4] Betriebssicherheitsverordnung – BetrSichV. s.l. : BGBl. I, 2002, S. 3777
- [5] BGR 104, Explosionsschutz-Regeln (EX-RL), Sammlung technischer Regeln für das Vermeiden der Gefahren durch explosionsfähige Atmosphäre mit Beispielsammlung zur Einteilung explosionsgefährdeter Bereiche in Zonen. s.l. : Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung, Juli 2008
- [6] Technische Regel für brennbare Flüssigkeiten, TRbF 30 – Füllstellen, Entleerstellen, Flugfeldbetankungsstellen. 2002, B ArbBl. 6, S. 68
- [7] Europäischen Übereinkommen über die internationale Beförderung gefährlicher Güter auf der Strasse (ADR). Anlage B in der seit 1.1.2009 geltenden Fassung
- [8] C. J. Chen, W. Rodi: Vertical turbulent buoyant jets – A review of experimental data. s.l. : Pergamon Press Ltd., 2008
- [9] B. Carissimo et al.: The SMEDIS database and validation exercise. *Int. J. Environment and Pollution*. 2001, Bd. 16, S. 614–629
- [10] Lee's Loss Prevention in the Process Industries, Vol. 1. Oxford : Elsevier Butterworth-Heinemann, 2005
- [11] Munro, R. J., Chatwin, P. C. and Mole, N.: The high concentration tails of the PDF of a dispersing scalar in the atmosphere. *Boundary-Layer Meteorology*, Volume 98, Number 2, February 2001, S. 315–339
- [12] H. Förster, W. Günther, G. Lindner, R. Model: Untersuchungen zur Explosionsgefahr beim Umschlag von Kerosin Jet A-1. *Technische Sicherheit*. 2011, Bde. 1–2 (Teil 1), 3 (Teil 2).
- [13] BGBl II der Republik Österreich Nr. 309. Verordnung explosionsfähige Atmosphäre – VEXAT. 26. Juli 2004
- [14] CEN/ TR 15120. Tanks für die Beförderung gefährlicher Güter – Leitlinien und Empfehlungen für Befüllung, Beförderung und Entladung. 2005-11

Gaswarnsysteme für den Explosionsschutz – Anforderungen an Explosionsschutz, Messfunktion und funktionale Sicherheit

Volkmar Lohse¹, Detlef Negendank², Martin Thedens³

1 Allgemeines

Gaswarnsysteme, aber auch einfachere Gaswarngeräte und -anlagen, finden in der Industrie breite Anwendung zur Gefahrenabwehr in explosionsgefährdeten Bereichen im Sinne der Richtlinie 94/9/EG (ATEX 95) [1]. Hierfür werden meist Geräte zur Konzentrationsmessung von brennbaren Gasen mit einem Messbereich von 0 % bis 100 % der jeweiligen UEG eingesetzt. Ziel ist die rechtzeitige und zuverlässige Warnung vor unzulässig hohen Brenngaskonzentrationen unter Betriebsbedingungen. Sauerstoffmessgeräte, die bestimmungsgemäß für die Überwachung von Inertierungsmaßnahmen verwendet werden, unterliegen ebenfalls den besonderen Anforderungen der ATEX-Richtlinie.

Diese Gaswarnsysteme müssen nicht zwingend als Ganzes innerhalb der explosionsgefährdeten Bereiche betrieben werden, die zugehörigen Sensoren sind jedoch immer im Gefahrenbereich installiert. Anders als die Sensoren müssen die Steuereinheiten von Gaswarnanlagen in diesem Fall nicht explosionsgeschützt ausgeführt sein, wobei die Rückwirkung der Systeme auf die Sensoren für die Sicherheitsbetrachtung der erforderlichen Explosionsschutzmaßnahmen zu berücksichtigen ist.

Die Einhaltung der Geräteanforderungen hinsichtlich der Explosionsschutzmaßnahmen als auch der Messfunktion ist in EG-Konformitätsbewertungsverfahren nach Richtlinie 94/9/EG durch Benannte Stellen nachzuweisen. Die Bewertung der Explosionsschutzmaßnahmen kann durch die PTB und die der Messfunktion durch die BAM durchgeführt werden. Auf ggf. zusätzliche Erfordernisse, die sich aus der EMV- [2] oder der Niederspannungsrichtlinie [3] ergeben, wird in diesem Beitrag nicht eingegangen.

Im Folgenden soll zumindest grob skizziert werden, welche Anforderungen derartige Geräte erfüllen müssen, wenn vorgesehen ist, diese für den Einsatz in explosionsgefährdeten Bereichen in Verkehr zu bringen.

2 Explosionsschutz

Eine Vermeidung des Wirksamwerdens einer Zündquelle ist die Explosionsschutzmaßnahme, nach der Geräte, die für den Einsatz innerhalb der explosionsgefährdeten Bereiche vorgesehen sind, konstruiert werden. Eine einfache Möglichkeit ist die sogenannte Zündschutzart „Druckfeste Kapselung“ gemäß EN 60079-1 [4], siehe Bild 1. Dabei wird das druckfeste Gehäuse des zu schützenden Gerätes derart konstruiert, dass eine möglicherweise auftretende Explosion im Inneren nicht zu einer Beschädigung des Gehäuses führt und dass keine Entzündung des das Gehäuse umgebenden explosionsfähigen Gas/Luft-Gemisches stattfindet.

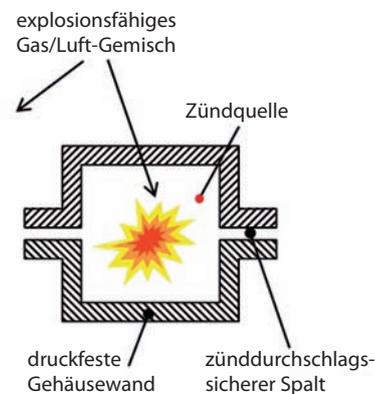


Bild 1: Schematische Darstellung der Zündschutzart „Druckfeste Kapselung“

Bei druckfest gekapselten Sensoren besteht der „Spalt“ aus einem gasdurchlässigen Element, so dass das zu messende Gas an die Messzelle im Inneren des Sensors gelangen kann. Die Elemente bestehen in der Regel aus Sintermetall, einem Drahtgewebe oder einem Metallschaum und sind so zu dimensionieren, dass die oben beschriebenen Anforderungen der Druckfesten Kapselung erfüllt werden. Im normativen Anhang B der EN 60079-1 sind zusätzliche Anforderungen an derartige Elemente mit nicht messbaren Spaltabmessungen beschrieben. Neben Materialbeschränkungen hinsichtlich der Verwendung von Leichtmetallen sind zur

¹ Dr. Volkmar Lohse, Leiter der BAM-Arbeitsgruppe „Prüfung und Einsatzgrundsätze von Gaswarngeräten“, volkmar.lohse@bam.de

² Dipl.-Ing. Detlef Negendank, BAM-Arbeitsgruppe „Prüfung und Einsatzgrundsätze von Gaswarngeräten“, detlef.negendank@bam.de

³ Dr.-Ing. Martin Thedens, Leiter der PTB-Arbeitsgruppe „Druckfeste Kapselung“, martin.thedens@ptb.de

Charakterisierung der Elemente u. a. folgende Angaben erforderlich:

- Werkstoff
- maximale Porengröße nach ISO 4003
- minimale Dichte nach ISO 2738
- Abmessungen des Elementes.

Die gasdurchlässigen Elemente können direkt in eine Gehäusewand eingebaut oder mit Hilfe eines z. B. in das Gehäuse einschraubbaren Adapters auswechselbar sein. Die Elemente selbst können u. a. eingepresst, eingesintert, eingeklebt oder verschweißt werden.

Die Explosionsschutzprüfungen werden nach den Anforderungen des Abschnittes „Prüfungen von druckfesten Gehäusen mit Atmungs- und Entwässerungseinrichtungen“ der EN 60079-1 durchgeführt. Dabei müssen die folgenden Prüfungen in der genannten Reihenfolge an einem zu prüfenden Element bestanden werden:

- Prüfung auf Schlagfestigkeit
- Prüfung auf Druckfestigkeit mit einem Bezugsdruck, der sich bei einem dicht gesetzten Element ergäbe
- Thermische Dauerbrandprüfung mit der Temperaturmessung zur Temperaturklassenfestlegung
- Prüfung auf Zünddurchschlagsicherheit.

An dem Explosionsgefäß (siehe Bild 2) ist eine Vakuumpumpe angeschlossen. Dadurch ist es möglich, die kleinen Sensorköpfe, mit einem Volumen von unter 10 cm³, so zu prüfen, dass ein zusätzliches Volumen, das durch die benötigte Anschlussstechnik (Gasversorgung, Drucksensoren, Zündkerze) entstehen könnte, so klein wie möglich gehalten wird.

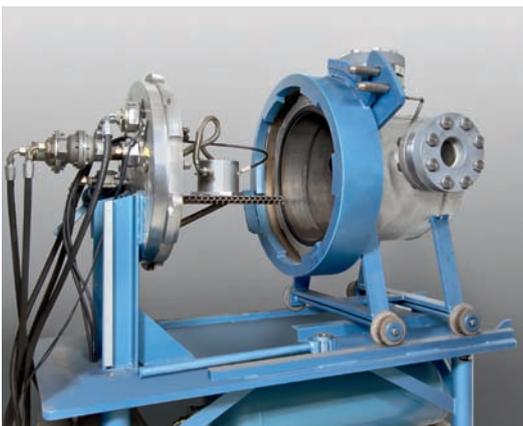


Bild 2:
Versuchskessel mit angeschlossener Vakuumpumpe zur Durchführung der Explosionsversuche

3 Messfunktion

Grundvoraussetzung für die Eignung von Gaswarntechnik ist die Erfüllung von Beschaffenheitsanforderungen, die in verschiedenen Europäischen Normen beschrieben sind. Für Geräte zur Messung von brennbaren Gasen sind dies die EN 60079-29-1 [5] oder die EN 60079-29-4 [6] und für die Messung von Sauerstoff die EN 50104 [7]. Darüber hinaus sind Anforderungen an die in den Geräten implementierte Software und Hardware in der EN 50271 [8] festgelegt (siehe auch Abschnitt „Funktionale Sicherheit“).

Neben allgemeinen Vorgaben zum Aufbau, zur Funktionsweise und zur Dokumentation werden in den genannten Normen eine Vielzahl von messtechnischen Eigenschaften gefordert, die sich am bestimmungsgemäßen Gebrauch und an den typischen Betriebsbedingungen am Einsatzort orientieren.

Allgemeine Anforderungen sind beispielsweise:

- Erkennen und Signalisierung einer Messbereichsüber- bzw. -unterschreitung
- Alarmeinstellbereiche und Auslegung der Alarm- und Ausgangssignale (z. B. selbsthaltender Hauptalarm)
- Geräteverhalten bei Vorliegen einer Störung und Einnahme von Sonderzuständen
- Beschreibung aller sicherheitstechnisch relevanten Sachverhalte in der Betriebsanleitung

Zu den wichtigsten messtechnischen Eigenschaften gehören:

- Eineindeutiger Zusammenhang zwischen Gaskonzentration und Messsignal im gesamten Messbereich im Rahmen der geforderten Messgenauigkeit (Kalibrierfunktion)
- Ausreichend kleine Einstellzeiten für die Messung des jeweiligen Zielgases (z. B. t_{90} -Zeit)
- Einhaltung einer Mindestmessgenauigkeit bei Veränderung klimatischer Parameter (Druck, Temperatur, Feuchte)
- Erhalt der Funktionsfähigkeit bei definierter EMV- und mechanischer Beanspruchung (Schwingen und Freifallen) und die
- Langzeitstabilität des Messsignals

Die Eignung eines Gerätes muss für jedes einzelne Messgas (Zielgas) durch zusätzliche Teilprüfungen nachgewiesen werden. So können z. B. am Sensor angebrachte Filter die Detektion von höhermolekularen Gasen/Dämpfen vollständig verhindern.

Die Anforderungen an die Messfunktion von Gaswarngeräten sind in der Richtlinie 94/9/EG im Anhang II Abschnitt 1.5.5 „Geräte mit einer Messfunktion für den Explosionsschutz“

beschrieben, sofern mit Hilfe dieser Gaswarnsysteme, -anlagen bzw. -geräte eine Schaltfunktion zum Zweck des Explosionsschutzes, gleich ob von Hand oder automatisch, ausgelöst wird.



Bild 3:
Prüfkammer zur Ermittlung von Messabweichungen bei Veränderung von Druck, Temperatur und Feuchte in Nullgas und Prüfgas



Bild 4:
Prüfvorrichtung zur Ermittlung der Kalibrierfunktion eines Gas-Transmitters

4 Funktionale Sicherheit

Unter funktionaler Sicherheit versteht man das Verhalten eines Mess- und Überwachungssystems im Fehlerfall unter sicherheitstechnischen Aspekten, also das Einnehmen eines sicheren Betriebszustandes bei Auftreten eines Fehlers. Für ortsfeste Gaswarnsysteme gewinnt die funktionale Sicherheit zunehmend an Bedeutung, vor allem dann, wenn das Sicherheitskonzept eines Betreibers diese höheren Anforderungen vorsieht oder weil die Signale des Gaswarnsystems auf ein bestehendes PLT-System mit definierter funktionaler Sicherheit aufgeschaltet werden sollen.

Fachgrundnorm für die funktionale Sicherheit sicherheitsbezogener elektrischer bzw. elektronischer Systeme ist die EN 61508 [9], deren sieben Teile in den vergangenen Jahren dem Stand der Technik angepasst und im Jahr 2010 veröffentlicht wurden. Sie definiert vier Sicherheitsstufen (SIL 1 bis SIL 4, Safety Integrity Level), die in der genannten Reihenfolge ein jeweils höheres Sicherheitsniveau abbilden. Aus der komplexen Struktur und den häufig nur sehr allgemeinen Aussagen dieser Norm resultiert eine recht schwierige Handhabung beim Umgang mit dieser Thematik. Aus diesem Grund wurde in Deutschland speziell für **ortsfeste Gaswarnsysteme** eine Produktnorm, die EN 50402 [10] geschaffen, die wegen der modularen Betrachtungsweise des Gaswarnsystems deutli-

che Vereinfachungen bei Produktentwicklung, -verifizierung und -bewertung hinsichtlich der SIL-Fähigkeit des Systems bietet.

Da aber auch die Richtlinie 94/9/EG im Anhang II, Abschnitte 1.5.5 bis 1.5.8, unabhängig vom SIL-Level z. B. die Berücksichtigung der Risiken durch Software (und damit auch digitalen Baueinheiten) **für alle Arten von Gaswarngeräten** mit einer Messfunktion für den Explosionsschutz fordert, wurde für diesen Bereich die EN 50271 [8] veröffentlicht, die über die ATEX-Richtlinie hinaus auch für alle anderen Messfunktionen von Gaswarngeräten, wie die Messung von Sauerstoff und von toxischen Gasen Anwendung findet.

Die neue Fassung EN 50271:2010 hat neben einer Präzisierung der Anforderungen an die Hardware, die Signalverarbeitung und Signalisierung von Betriebszuständen vor allem die Anforderungen an den Software-Entwicklungsprozess und -Validierungsprozess und der damit einhergehenden Dokumentation deutlich präzisiert. Ziel ist dabei die Vermeidung von systematischen Software-Fehlern. Diese Norm gilt grundsätzlich für alle Gaswarngeräte ohne SIL-Klassifizierung, kann darüber hinaus aber auch für Gaswarnanlagen bis SIL 1 angewendet werden. Bild 5 zeigt das an die Erfordernisse dieser Gaswarngeräte angepasste „V-Modell“ zum Software-Entwicklungsprozess.

Geräte, die nicht unter Berücksichtigung dieses „V-Modells“ entwickelt wurden, können im Nachhinein nur mit hohem Aufwand an die Anforderungen der neuen EN 50271 angepasst werden – es müsste faktisch eine „Neuentwicklung“ des Gerätes in weiten Teilen der Designphase erfolgen. Aus diesem Grund haben die für diesen Teilbereich zuständigen deutschen Benannten Stellen frühzeitig diesbezügliche Informationen an alle bekannten Gerätehersteller gegeben, da eine 3-jährige Übergangsfrist für die ausschließliche Anwendung der neuen EN 50271 doch recht knapp bemessen ist.

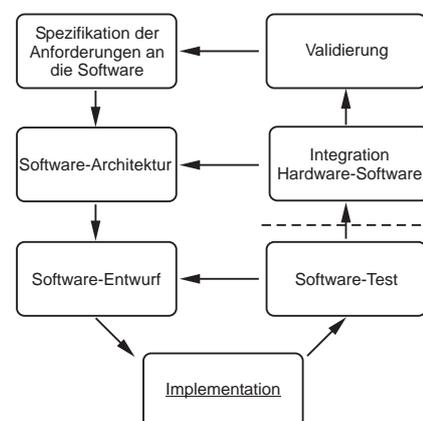


Bild 5:
„V-Modell“ zum Software-Entwicklungsprozess nach EN 50271:2010

5 Literatur

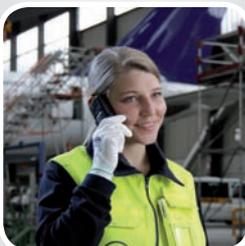
- [1] Richtlinie 94/9/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. März 1994 zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten für Geräte und Schutzsysteme zur bestimmungsgemäßen Verwendung in explosionsgefährdeten Bereichen, Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften Nr. L 100/1, 19.04.1994
- [2] Richtlinie 2004/108/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 15. Dezember 2004 zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über die elektromagnetische Verträglichkeit, Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften Nr. L 390/24, 31.12.2004
- [3] Richtlinie 2006/95/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 12. Dezember 2006 zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten betreffend elektrische Betriebsmittel zur Verwendung innerhalb bestimmter Spannungsgrenzen, Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften Nr. L 374/10, 27. Dezember 2006
- [4] EN 60079-1 „Explosionsfähige Atmosphäre – Teil 1: Geräteschutz durch druckfeste Kapselung „d“
- [5] EN 60079-29-1 „Explosionsfähige Atmosphäre – Teil 29-1: Gasmessgeräte – Anforderungen an das Betriebsverhalten von Geräten für die Messung brennbarer Gase“
- [6] EN 60079-29-4 „Explosionsfähige Atmosphäre – Teil 29-4: Anforderungen an Geräte mit einer offenen Messstrecke für die Detektion brennbarer und toxischer Gase und Dämpfe“
- [7] EN 50104 „Elektrische Geräte für die Detektion und Messung von Sauerstoff – Anforderungen an das Betriebsverhalten und Prüfverfahren“
- [8] EN 50271 „Elektrische Geräte für die Detektion und Messung von brennbaren Gasen, giftigen Gasen oder Sauerstoff – Anforderungen und Prüfungen für Warngeräte, die Software und/oder Digitaltechnik nutzen“
- [9] EN 61508 „Funktionale Sicherheit sicherheitsbezogener elektrischer/elektronischer/programmierbarer elektronischer Systeme“
- [10] EN 50402 „Elektrische Geräte für die Detektion und Messung von brennbaren oder toxischen Gasen und Dämpfen oder Sauerstoff – Anforderungen an die funktionale Sicherheit von ortsfesten Gaswarnsystemen“

25 Jahre
-Schutz
 1986 - 2011

ecom
 instruments

mobile experts

Mobile Geräte für den Einsatz im Ex-Bereich



Kommunikation:
 Mobiltelefone, Funkgeräte,
 Headsets



Mobile Computing:
 Laptops, PDAs,
 RFID transponder



Mess- und Kalibriertechnik:
 Temperaturmessgeräte,
 Prüf- und Hilfsmittel,
 Kalibratoren, Wanduhren



Portable Handlampen:
 Taschenlampen, Inspektions-
 lampen, Handscheinwerfer,
 Stirnlampen, Laserpointer



ecom instruments GmbH Industriestraße 2 • 97959 Assamstadt

Tel.: 0 62 94 / 42 24-0 • Fax: 0 62 94 / 42 24 -100 • sales@ecom-ex.com • www.ecom-ex.com

Zündung durch elektrische Entladungen

Detlef Markus¹, Tim Langer², Udo Gerlach³, Frank Lienesch⁴

1 Einleitung

Elektrische Zündquellen müssen bei der sicherheitstechnischen Beurteilung von explosionsgefährdeten Bereichen berücksichtigt werden. Dabei kann es bei der Verwendung von elektrischen Geräten sowohl im Normalbetrieb als auch im Fehlerfall infolge einer Gasentladung zu einer Zündung kommen. Aber auch die elektrostatische Aufladung von Anlagenteilen infolge einer Ladungstrennung kann zu einer zündfähigen Entladung führen. Daher wurden verschiedene Schutzkonzepte zur Beurteilung der Zündfähigkeit von elektrischen Zündquellen erarbeitet. In diesem Beitrag werden Untersuchungen von drei verschiedenen Entladungsformen vorgestellt, bei denen durch eine Ermittlung der übertragenden Ladung, der in das Gasgemisch eingekoppelten Energiedichte oder der Dauer der Entladung Aussagen über die Zündfähigkeit getroffen werden können.

Das Konzept der Mindestzündenergie beschreibt beispielsweise die Zündwilligkeit explosionsfähiger Gemische durch einen elektrischen Funken [1]. Die Zündquelle ist dabei ein kleiner Funke infolge einer Kondensatorentladung, dessen Energie aus der elektrischen Kapazität und der Spannung bestimmt werden kann. Die Entladung heizt dabei innerhalb weniger Nanosekunden ein möglichst kleines Volumen entlang der Funkenstrecke auf. Die Störung der sich entwickelnden Flammenausbreitung durch die Elektroden infolge von Radikalentzug an den Oberflächen und durch Wärmeleitung erfordert jedoch sowohl eine umfangreiche Untersuchung sämtlicher Funkenparameter wie Funkenlänge und Funkendauer als auch des Einflusses der Elektrodeneigenschaften auf den Zündprozess. Oftmals ist daher eine Messung der maximal übertragbaren Ladung sinnvoller, welche mit der Mindestzündenergie korreliert.

Zündfähige elektrische Entladungen bei der Verwendung elektrischer Geräte in explosionsgefährdeten Bereichen müssen vermieden werden. So ist eine Dimensionierung von Luft- und Kriechstrecken notwendig, die im Wesentlichen auf einer Beurteilung der Durchschlagsfestigkeit

des umgebenden Gasgemisches beruht. Hier hat sich gezeigt, dass es bei hochfrequenten Wechselströmen anders als bei der Verwendung von Netzfrequenz zu nichtthermischen Teilentladungen kommen kann, die ein explosionsfähiges Gemisch entzünden können [2]. Für ein besseres Verständnis der Zündprozesse ist es dabei sinnvoll, das Konzept einer Mindestzündenergiedichte zu betrachten, umso den Einfluss der Versuchsanordnung zu minimieren [3, 4].

Bei Verwendung von elektrischen Niederspannungskreisen können Gasentladungen in Form von Öffnungs- oder Schließfunken ebenfalls als Zündquelle wirken. Eine Beurteilung der zu erwartenden Entladungen in eigensicheren Stromkreisen erfolgt dabei bislang durch Bestimmung einer Zündwahrscheinlichkeit mit Hilfe des international genormten Funkenprüfgerätes [1]. Bei einem Öffnungsvorgang werden die metallischen Berührungsstellen bis zur Schmelztemperatur erhitzt. Die Schmelzbrücke kann danach bis zum Erreichen einer Siedespannung erhitzt werden, bei der der Kontaktstoff verdampft, was zu einem elektrischen Bogen führen kann. Auch beim Schließvorgang kann es aufgrund der hohen elektrischen Feldstärke zu einer Gasentladung in Form eines kurzen Bogens oder einer Bogenentladung kommen [5]. Bei der Verwendung von Geräten der Zündschutzart „Eigensicherheit“ werden daher Strom und Spannung derart begrenzt, dass eine elektrische Entladung keine ausreichende Energie zur Zündung eines explosionsfähigen Gemisches freisetzen kann. Vorteil der eigensicheren Geräte ist ihre einfache Handhabung, so dass beispielsweise Geräte auch unter Last vom Netz getrennt werden dürfen. Jedoch können bislang aufgrund der notwendigen Begrenzung der elektrischen Parameter nur Geräte mit einer Leistungsaufnahme bis zu 2 W verwendet werden, womit die Anwendung auf einfache Geräte der Mess- und Regeltechnik beschränkt ist. Mit dynamisch wirkenden eigensicheren Stromkreisen, die der innovativen „Power-i“/DART-Technologie entsprechen, können deutliche höhere Ausgangsleistungen von bis zu 50 W verwendet werden.

¹ Dr.-Ing. Detlef Markus, PTB-Fachbereich „Zünddurchschlagsprozesse“, detlef.markus@ptb.de

² Dipl.-Phys. Tim Langer, PTB-Fachbereich „Zünddurchschlagsprozesse“, tim.langer@ptb.de

³ Dr.-Ing. Udo Gerlach, PTB-Fachbereich „System- und Eigensicherheit“, udo.gerlach@ptb.de

⁴ Dr.-Ing. Frank Lienesch, PTB-Fachbereich „Zündquellensicherheit“, frank.lienesch@ptb.de

Die beschriebenen Charakterisierungen der Zündfähigkeit von verschiedenen elektrischen Entladungen ermöglichen eine sinnvolle sicherheitstechnische Beurteilung der jeweils zu erwartenden elektrischen Zündquellen. In diesem Beitrag werden experimentelle und numerische Untersuchungen zur Zündfähigkeit der verschiedenen elektrischen Entladungen vorgestellt, die langfristig eine Beurteilung der Zündwahrscheinlichkeit unabhängig von der Art der elektrischen Entladung ermöglichen sollen.

2 Grundlagen

2.1 Elektrischer Durchschlag in Gasen

Bei der Beschreibung des Gasdurchschlags nach dem Townsend-Mechanismus oder nach dem Streamer-Modell wird bei ausreichender elektrischer Feldstärke davon ausgegangen, dass sich ausgehend von wenigen Startelektronen auf dem Weg von der Kathode zur Anode durch Ionisation der Gasmoleküle eine Elektronenlawine bildet [6]. Das Gas wird in einem engen Kanal leitfähig. Somit kann es zum Potentialausgleich in Form einer elektrischen Entladung kommen. Das entstehende Plasma in diesem Kanal kann dabei Temperaturen von einigen 1000 K erreichen [7].

2.2 Zündung explosionsfähiger Gasgemische

Die Fremdzündung von Kohlenwasserstoff/Luft-Gemischen oder Wasserstoff/Luft-Gemischen basiert im Wesentlichen auf einer Selbstzündung der Brennstoff/Luft-Gemische in Folge der Energiezufuhr durch die elektrische Entladung. Im Fall einer klassischen Funkenzündung bei der ottomotorischen Verbrennung wird ein kleines Volumen lokal erhitzt. Danach bilden sich aufgrund der Wärmezufuhr durch Stöße der Gasmoleküle reaktive Radikale, die letztendlich den Übergang in eine sich selbst erhaltene Flammenausbreitung ermöglichen können [3]. Dabei ist mit Ausnahme von sehr langen Funkenzeiten oder sehr kleinen Zündvolumina nur die Erwärmung des Zündvolumens durch die elektrische Entladung maßgeblich, da Wärmeverluste vernachlässigbar sind. Aus der Funkenenergie und dem Zündvolumen lässt sich so eine Mindestzündenergiedichte ermitteln. Unabhängig von Funkendauer und Zündvolumen kann – mit Ausnahme der oben beschriebenen Einschränkungen – damit das entsprechende Brennstoff/Luft-Gemisch immer gezündet werden. Da die anschließende Geschwindigkeit der Flammenausbreitung von der Zündenergiedichte unabhängig ist, kann somit die im Funken umgesetzte Energie bei Kenntnis des Zündvolumens und der Zündverzugszeit aus der Flammengeschwindigkeit ermittelt werden [8].

Bei nichtthermischen Gasentladungen wie Streamer- oder Barrierenentladungen wird die

elektrische Energie zu einem großen Teil in Form von kinetischer Energie von Elektronen umgesetzt. Daher muss neben der Erwärmung des Gasvolumens die Erzeugung von Radikalen durch Dissoziation von Gasmolekülen in Folge von Stößen mit hochenergetischen Elektronen betrachtet werden [9]. Im Vergleich zur klassischen Funkenzündung kann somit bei geringerer Aufheizung die Zündverzugszeit signifikant verkürzt oder die Selbstzündungstemperatur des Gemisches erniedrigt werden, wodurch beispielsweise die Verbrennung von sehr mageren Gemischen unterstützt werden kann [10].

3 Ergebnisse

3.1 Elektrostatik

Elektrostatistische Entladungen sind eine der häufigsten Ursachen von Unfällen in explosionsgefährdeten Bereichen. Dabei lassen sich drei Entladungsarten unterscheiden – Gleitstielbüschelentladungen, Funkenentladungen und Büschelentladungen (siehe Bild 1). Gleitstielbüschelentladungen können infolge von Ladungsansammlungen auf leitfähig hinterlegten Kunststoffschichten entstehen, wenn der Leiter geerdet ist. Funkenentladungen treten zwischen zwei elektrischen Leitern auf – in der Praxis z. B. zwischen einem aufgeladenen Metallteil und einem menschlichen Körperteil. Büschelentladungen werden beobachtet, wenn es zu einer Aufladung nicht ableitfähiger Kunststoffe kommt. Die elektrostatistische Entladung findet bei allen drei Entladungsarten statt, wenn eine Gegenelektrode in das elektrische Feld der Ladungskonfiguration gebracht wird und dabei die Durchbruchfeldstärke des jeweiligen Mediums erreicht wird.

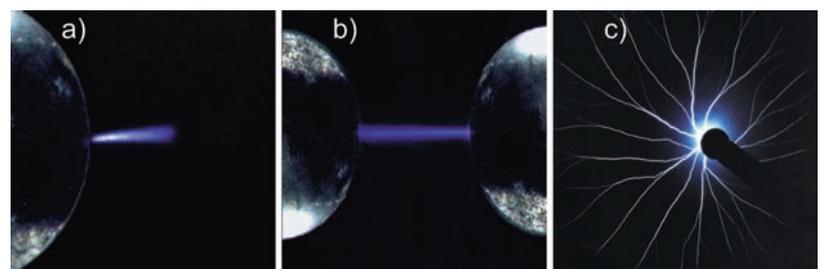


Bild 1:

Elektrostatistische Entladungsformen:

a) Büschelentladung,

b) Funkenentladung,

c) Gleitstielbüschelentladung

Für die sicherheitstechnische Bewertung von Produkten hinsichtlich der Gefahr potentieller elektrostatistischer Entladungen ist die Energie der verschiedenen Entladungsformen für die Praxis oftmals keine brauchbare Messgröße, da diese nur selten direkt messbar ist. Ein geeignetes sicherheitstechnisches Kriterium ist dagegen die bei dem Entladungsvorgang übertragene elektrische Ladung [11]. In verschiedenen Regelwerken sind für die unterschiedlichen Explosionsgrup-

pen zulässige Grenzwerte übertragener Ladung definiert. Die Grenzwerte basieren dabei auf einer Äquivalenzbetrachtung zur Mindestzündenergie, wurden aber bisher nur unzureichend direkt experimentell verifiziert. Dieses wurde kürzlich in umfangreichen Tests mit Büschel- und Funkenentladungen nachgeholt [12].

Der Versuchsaufbau für die Bestimmung der übertragenen Ladung bei Büschelentladungen ist in Bild 2 gezeigt. Eine Kunststoffscheibe wird in einem Versuchsgefäß, welches mit dem zu untersuchenden Brennstoff/Luftgemisch gefüllt ist, mittels Corona aufgeladen. Anschließend wird eine Elektrode, die leitfähig mit einem Coulombmeter verbunden ist, langsam der aufgeladenen Fläche genähert, bis es zu einer Entladung kommt. Neben der Messung der übertragenen Ladung kann so gleichzeitig überprüft werden, ob es zu einer Zündung des explosionsfähigen Gemisches kommt. Zusätzlich wird der Abstand zwischen Elektrode und aufgeladener Kunststofffläche bestimmt.

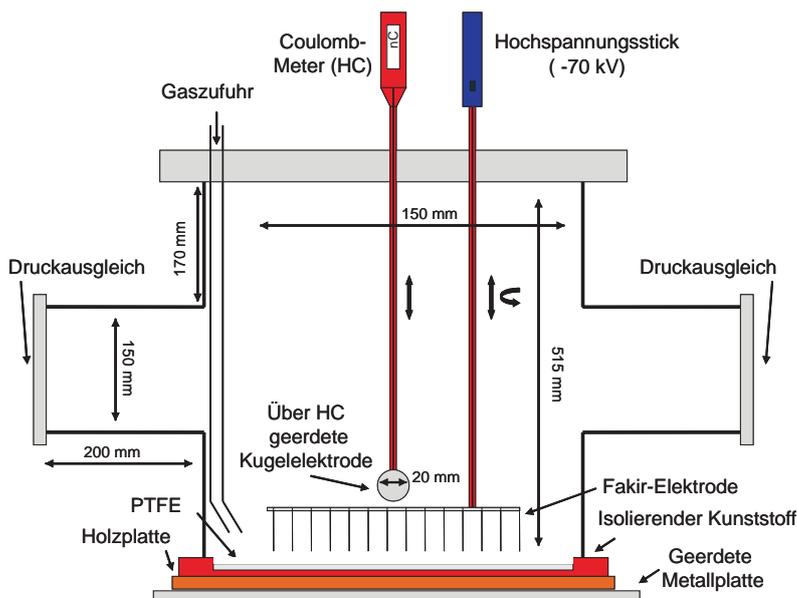


Bild 2:
Versuchsaufbau zur Verifizierung der Grenzwerte mit Büschelentladungen

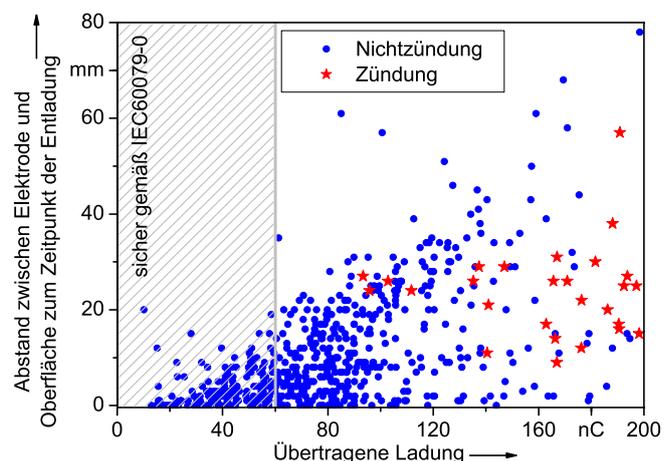
Die Ergebnisse der Tests hinsichtlich der Grenzwerte für die Explosionsgruppe IIA wurden mit dem Referenzgemisch Propan/Luft in der zündwilligsten Zusammensetzung mit einem Propananteil von 5,2 Vol.-% durchgeführt. Das Ergebnis der Experimente ist in Bild 3 gezeigt. Es ist zu erkennen, dass die Häufigkeit der Zündungen mit dem Betrag der übertragenen Ladung zunimmt. Innerhalb des schraffierten Bereichs darf es gemäß dem Grenzwert von 60 nC zu keiner Zündung des Propan/Luftgemisches kommen. Wie in Bild 3 zu sehen ist, konnte der Grenzwert für die Explosionsgruppe IIA von 60 nC als sicherheitstechnisch ausreichend bestätigt werden.

In Bild 4 ist die Häufigkeit der Zündungen über der übertragenen Ladung aufgetragen. Die gefundene Verteilung lässt sich dabei statistisch sehr gut mit einem Fit der in Bild 4 angegebenen kumulierten Verteilungsfunktion beschreiben. Die Berücksichtigung statistischer Verfahren könnte es in der Zukunft ermöglichen, die wichtigen Grenzwerte für sicherheitstechnische Beurteilungen direkt auf eine Zündwahrscheinlichkeit zu beziehen. Damit könnten einheitliche Sicherheitslevel für alle Grenzwerte definiert werden. Jedoch muss dazu auch die Messunsicherheit der verwendeten Verfahren bei der Bestimmung der Grenzwerte noch konsequenter in die Betrachtungen einbezogen werden.

3.2 Zündung durch Vorentladungen

Bei der Verwendung von Frequenzumrichter an Drehstrommotoren können bei Schaltvorgängen wesentlich höhere Frequenzen als die Grundfrequenz auftreten. Dabei können Gasentladungen beobachtet werden, die abhängig von der Gemischzusammensetzung, Elektrodenabstand und den elektrischen Parametern nicht zu einem Durchschlag führen, aber dennoch ein explosionsfähiges Gemisch zünden können [2]. Da die Gasentladung erlischt, bevor eine Thermalisierung zwischen den Gasmolekülen und Elektronen in der Entladungsstrecke abgeschlossen ist, liegt in diesem Fall ein nichtthermisches

Bild 3:
Ergebnisse der Experimente mit Büschelentladungen von einer aufgeladenen PTFE-Fläche (270 cm²) in einem 5,2 Vol.-% Propan/Luft-Gemisch



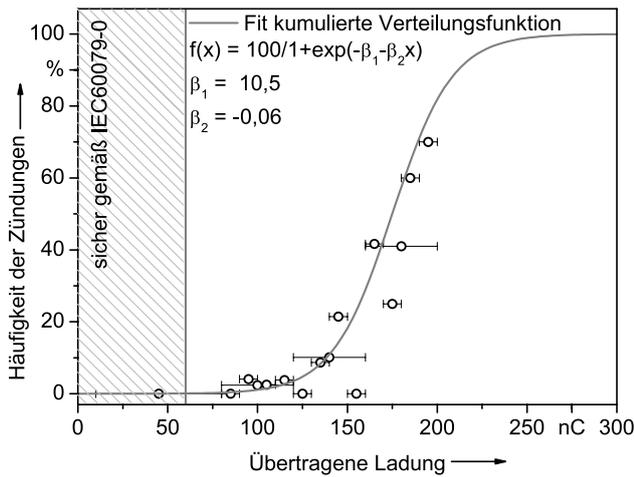


Bild 4: Häufigkeit der Zündungen in einem 5,2 Vol.-% Propan/Luft-Gemisch in Abhängigkeit der übertragenen Ladung mit Fit mit kumulierter Verteilungsfunktion

Plasma vor. Bild 5 zeigt die Chemolumineszenz von bis zu 800 aufeinander folgenden Vorentladungen. Es ist zu erkennen, dass die Streamerlänge mit Anzahl der Vorentladungen anwächst. Genauso konnte beobachtet werden, dass die Zündwahrscheinlichkeit von der Anzahl der verwendeten Schwingungszyklen abhängt [2]. Demzufolge kommt es zu einer Akkumulation der einzelnen Energieeinträge im Entladungsgebiet, welches sich auch durch numerische Untersuchungen der Zündprozesse belegen lässt [13].

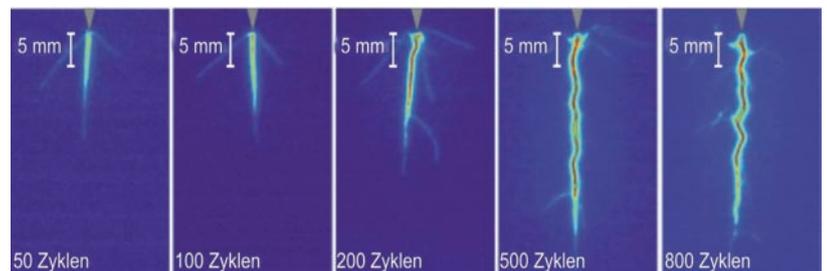


Bild 5: Chemolumineszenz von Streamerentladungen in Luft [14]

Bild 6 zeigt die Flammenausbreitung nach Zündung eines 20 Vol.-% Wasserstoff/Luft-Gemisches durch 30 aufeinander folgende Vorentladungen bei Verwendung einer Spannung von 12 kV. Bild 6 setzt sich aus den Teilbildern dreier Einzelexperimente A, B und C zusammen. In einem Experiment wurden zeitaufgelöst vier Einzelbilder der laserinduzierten Fluoreszenz von OH-Radikalen, einem wichtigen Zwischenprodukt der Verbrennung, aufgenommen. Die Zündung wird erstmals sichtbar nach 180 µs direkt unterhalb der eingezeichneten Elektrode. Danach ist im weiteren Zeitverlauf die Flammenausbreitung zu beobachten. Da die Lasermessungen direkt unterhalb der Spitze beginnen, ist in den Einzelbildern nur die Flammenausbreitung nach unten zu sehen. Bei genauerer Betrachtung fällt jedoch auf, dass die senkrechte Flammenausbreitung durch die vorher stattgefundenen Vorentladungen beeinflusst wird. Daher wird nur die radiale Flammenausbreitung für die weitere Auswertung betrachtet.

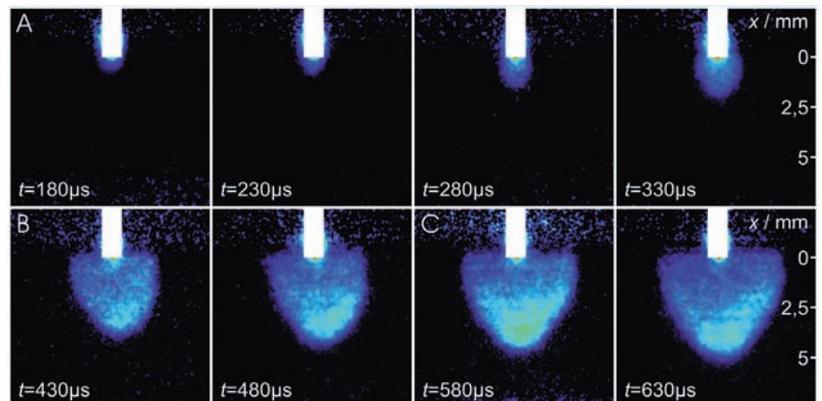


Bild 6: Flammenausbreitung nach Zündung von 20 Vol.-% Wasserstoff/Luft-Gemischen durch Vorentladungen, visualisiert durch laserinduzierte Fluoreszenz von OH-Radikalen

In Bild 7 sind experimentell bestimmte Flammendurchmesser zu verschiedenen Zeiten nach Beginn der Energieeinkopplung in 25 Vol.-% Wasserstoff/Luft-Gemisch aufgetragen. Die Bestimmung erfolgte aus vielen Teilbildern 1 mm unterhalb der Elektrode. Die Schwankung der Flammendurchmesser beruht im Wesentlichen auf der Schwankung der Zündverzugszeit in Folge von Schwankungen der elektrischen Quelle. Ebenfalls eingetragen sind numerisch

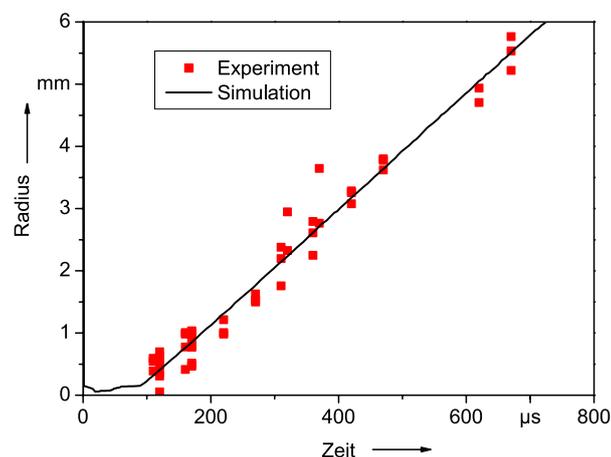


Bild 7: Vergleich experimentell bestimmter Flammendurchmesser 1 mm unterhalb der Elektrode mit numerischen Ergebnissen (25 Vol.-% Wasserstoff/Luft-Gemisch, 30 Spannungszyklen)

berechnete Flammendurchmesser als Funktion der Zeit. Es ist zu erkennen, dass trotz der Schwankungen die gemittelte experimentelle Flammenausbreitung sehr gut mit der numerischen übereinstimmt.

Bei einer Zündung durch mehrere aufeinander folgende Vorentladungen kann nicht allein aus den elektrischen Parametern eine Aussage über die Zündenergie getroffen werden. Vielmehr müssen Zündverzugszeit und Zündvolumen bekannt sein. Ein Vergleich von experimentellen und numerischen Flammenausbreitungen wie in Bild 7 gezeigt unterstützt dabei die Bestimmung der Zündenergie [8].

3.3 Dynamische Beeinflussung elektrischer Funken

Die umgesetzte elektrische Energie eines Funkens ergibt sich aus dem Integral des Produktes von Strom und Spannung über die Zeit. Die Funkendauer eines Öffnungsfunkens mit konventioneller Energieversorgung, d.h. bei Verwendung einer Quelle mit einer ohmschen Strombegrenzung, kann zwischen ca. 20 μs und bis 2 ms schwanken. Demzufolge variiert auch die mögliche Funkenenergie. Dem wird durch die Begrenzung der zulässigen Werte von Spannung und Strom Rechnung getragen. Daher resultieren die geringen zulässigen Werte für konventionelle eigensichere Kreise.

Bild 8a) zeigt den Verlauf von Strom und Spannung einer Entladung bei Verwendung einer konventionellen Energieversorgung mit einer Gesamtfunkendauer von 180 μs . Charakteristisch für die hier beschriebenen Öffnungsfunken ist der schnelle Spannungsanstieg innerhalb von ca. 40 ns mit Beginn der Gasentladung. Durch umfangreiche Untersuchungen von Öff-

nungsfunken an verschiedenen Stromkreisen konnte gezeigt werden, dass die Gasentladung immer mit einem sehr schnellen Anstieg innerhalb von maximal 50 ns beginnt, der mittels eines Hochpass eindeutig auswertbar ist [15]. Die „Power-i“/DART®-Technologie, welche maßgeblich an der PTB entwickelt wurde, begrenzt durch Erkennen einer Gasentladung in Verbindung mit einer schnellen Abschaltung der Versorgungsspannung die Funkenenergie (DART: Dynamic Arc Recognition and Termination). „Power - i“/DART erlaubt daher deutlich höhere zur Verfügung stehende eigensichere Anschlusswerte als sie bei Verwendung mit konventionellen eigensicheren Konzepten möglich sind. Ein mit „Power-i“/DART geschützter elektrischer Stromkreis besteht aus einer Quelle, den Verbrauchern und der zugehörigen Verbindungsleitung. Die Quelle beinhaltet Detektoren zur Erkennung von positiven und negativen Stromsprüngen und Überlastzuständen. Bild 8b) zeigt die zeitlichen Verläufe von Strom und Spannung eines Öffnungsfunkens bei Verwendung einer solchen Quelle. Nach Erkennen des Spannungsanstiegs schaltet die Quelle ab und die Dauer der elektrischen Entladung wird in diesem Beispiel auf 15 μs begrenzt. Damit wird die Wahrscheinlichkeit einer Zündung deutlich herabgesetzt.

„Power-i“/DART beruht somit auf einer Schnellabschaltung, bei der sämtliche im System für eine mögliche Zündung explosionsfähiger Gemische in einer bestimmten Zeiteinheit verfügbare Energie auf ein sichereres Maß reduziert wird. Jedoch muss die Zeit, in der eine Gasentladung stattfindet, genau definiert werden. Dieses ist bei „Power-i“/DART möglich, da die Reaktionszeit genau berechnet werden kann. Neben der Ansprechzeit der Hardware von ca. 2 μs muss dabei auch die Signallaufzeit entsprechend der Leitungslänge zwischen Quelle und möglicher Fehlerstelle betrachtet werden. Dabei muss berücksichtigt werden, dass diese von der Art des verwendeten Kabels abhängt. Benötigt z. B. ein Signal in einem Standard-Feldbuskabel 5,5 μs für 1000 m, so kann die Quelle nach maximal 7,5 μs auf eine Entladung reagieren. Erst nach weiteren 5,5 μs wird dann an der Fehlerstelle die Spannung begrenzt. Somit ergibt sich für das hier verwendete Feldbuskabel eine Reaktionszeit von 13 μs bei 1000 m Leitungslänge. Die maximal zulässige Leistung im System ist daher neben der Gasgruppe von der Signallaufzeit sowie von der Reaktionszeit der Quelle abhängig. In Bild 9 sind die „Power-i“-Zündgrenzkurven für verschiedene Versorgungsspannungen bei Verwendung des hier betrachteten Feldbuskabels aufgezeichnet. Andere Kabeltypen bedeuten andere Signallaufzeiten. Daraus wird die Abhängigkeit der verfügbaren Leistung

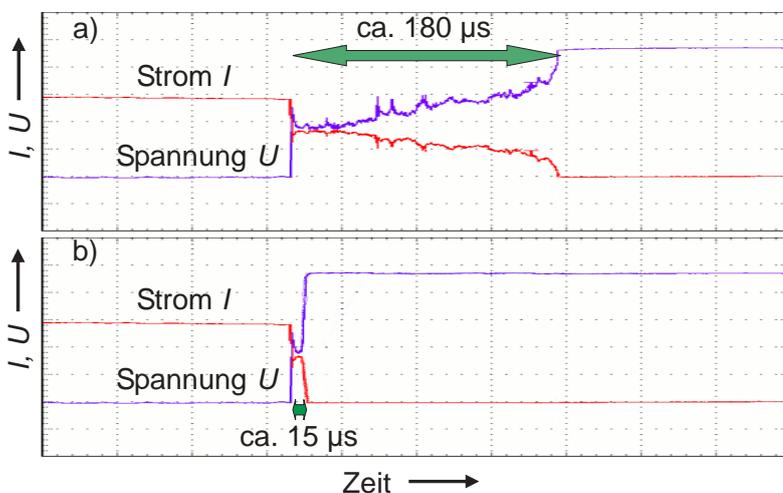


Bild 8:
Vergleich von Strom- und Spannungsverläufen eines Öffnungsfunkens
a) bei Verwendung von konventioneller Energieversorgung und
b) bei Verwendung von Power - i

für verschiedene Spannungswerte ersichtlich. So ergibt sich bei Verwendung einer Versorgungsspannung von 50 V eine zulässige Ausgangsleistung von max. 12 W bei einer zu erwartenden Reaktionszeit von 13 μs . Für das als Beispiel aufgeführte Kabel entspricht dieses (s. Bild 9) einer zulässigen maximalen Leitungslänge zwischen Quelle und Verbraucher von ca. 1000 m.

Die zu erwartenden Leistungen würden bei einer klassischen Versorgungsquelle zu inakzeptablen Zündwahrscheinlichkeiten führen, da üblicherweise eine größere Anzahl an Entladungen während eines Fehlerfalls zu erwarten ist. Bei „Power-i“/DART schaltet die Quelle bei einer Störung für ca. 3 ms ab, womit sichergestellt ist, dass die erste Entladung sicher erloschen ist. Erst danach wird die Quelle wieder eingeschaltet. Dieses geschieht auch nur dann, wenn der Stromkreis als sicherheitstechnisch fehlerfrei erkannt wird. Auf diese Weise reduziert sich die Zahl der auftretenden Entladungen drastisch, so dass für die singuläre Entladung eine höhere Zündwahrscheinlichkeit akzeptiert werden kann [16].

4 Zusammenfassung

Eine Bewertung von elektrischen Zündquellen erfordert ein vertieftes Verständnis über die physikalischen und chemischen Prozesse, die bei der Zündung eines explosionsfähigen Gemisches ablaufen. In diesem Beitrag wurden Untersuchungen zu drei verschiedenen elektrischen Entladungsformen vorgestellt. Motiviert durch neue Anwendungen wie den Einsatz von Frequenzumrichtern zum Antrieb von Drehmotoren der Zündschutzart „Erhöhte Sicherheit“ werden Grundlagenuntersuchungen zur Zündung durch Vorentladungen durchgeführt. Um den Einfluss der Bildung von Radikalen infolge der Dissoziation von Gasmolekülen auf den Zündprozess zu bestimmen, werden experimentell Energiedichten ermittelt und mit numerischen Ergebnissen verglichen. Die vorgestellten Arbeiten der PTB zur Bestimmung der übertragenen elektrischen Ladung haben ergeben, dass diese mit der Mindestzündenergie korreliert. Somit ermöglicht die Bestimmung der übertragenen Ladung bei einem Entladungsvorgang eine Beurteilung der Zündgefahren in Folge der elektrostatischen Entladung, welches die Beurteilung von Produkten deutlich erleichtert. Dabei hat sich gezeigt, dass eine Ermittlung von Zündwahrscheinlichkeiten durch statische Verfahren einheitliche Sicherheitslevel unabhängig vom jeweils betrachteten Grenzwert ermöglicht. Am Beispiel von „Power-i/DART“ wurde gezeigt, dass die experimentellen und numerischen Untersuchungen der Zündung durch elektrische Entladungen auch neue innovative Produkte für den Einsatz in explosionsgefährdeten Bereichen ermöglichen. „Power-i“/DART wurde von der PTB in Zusammenarbeit

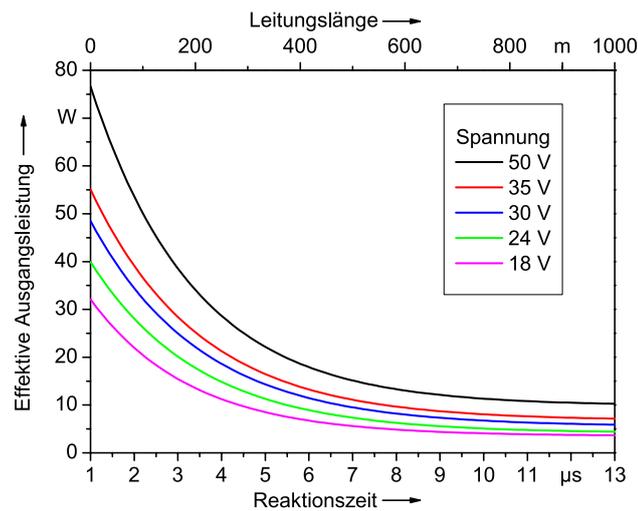


Bild 9: Zündgrenzkurven der effektiven Ausgangsleistung in Abhängigkeit von der System-Reaktionszeit für verschiedene Ausgangsspannungen. Die hier aufgetragene Leitungslänge ergibt sich für einen spezifizierten Leitungstyp.

mit mehreren Unternehmen entwickelt, welche bereits erste Produkte in den Markt einführen. Hierbei erkennen Detektoren im Fehlerfall auftretende Entladungen, so dass diese durch eine Unterbrechung der Spannungsversorgung zeitlich begrenzt werden. Da „Power-i“/DART im Vergleich zu konventionellen eigensicheren Lösungen eine wesentlich höhere effektive Ausgangsleistung erlaubt, kann so die kostengünstige Zündschutzart „Eigensicherheit“ in vielen neuen Applikationen zum Einsatz kommen.

5 Literaturverzeichnis

- [1] Krämer, H. und Glor, M.: Elektrische Zündquellen. In: Handbuch des Explosionsschutzes, Steen, H. (Hrsg.). Wiley-VCH, Weinheim (2000) S. 75–112
- [2] Lienesch, F., Homann, S., Markus, D. und Spilling, M.: Zündung von Wasserstoff/Luftgemischen durch elektrische Entladungen bei hochfrequenter Wechselspannung. Chem. Ing. Tech. **79**, (2007) 473–477
- [3] Warnatz, J., Maas, U. und Dibble, R.: Verbrennung. Springer-Verlag, Berlin, 3. Aufl. (2001)
- [4] Bane, S.: Spark ignition: Experimental and numerical investigation with application to aviation safety. Dissertation, California Institute of Technology, Pasadena (2010)
- [5] Johannsmeyer, U.: Zündung explosionsfähiger Gemische durch kurzzeitige Schließfunken in kapazitiven Stromkreisen für die Zündschutzart Eigensicherheit. Dissertation, Technische Universität Braunschweig (1984)
- [6] Krdzalik, G.: Simulation der Funkendurchbruchphase in Gasen mittels stochastischer Methoden. Dissertation Universität Dortmund (2006)

- [7] *Kravchik, G. und Sher, E.*: Numerical modeling of spark-ignition and flame initiation in a quiescent methane-air mixture. *Combust. Flame* **99**, (1994) 635–643
- [8] *Dreizler, A., Lindenmaier, S., Maas, U., Hult, J., Aldén, M. und Kaminski, C.*: Characterisation of a spark ignition system by planar laser-induced fluorescence of OH at high repetition rates and comparison with chemical kinetic calculations. *Appl. Phys. B* **70**, (2000) 287–294
- [9] *Starikovskaia, S.*: Plasma assisted ignition and combustion. *J. Phys. D: Appl. Phys.* (2006) **39** R265–R299
- [10] *Pilla, G., Galley, D., Lacoste, D., Lacas, F., Veynante, D. und Laux, C.*: Influence of the repetition rate of a nanosecond pulsed discharge on the stabilization of a turbulent lean premixed flame. In: 37th AIAA Plasma-dynamics and Lasers Conference, San Francisco (2006) AIAA-2006-3243
- [11] *von Pidoll, U., Brzostek, E. und Fröchtenigt, H.-R.*: Determining the incendivity of electrostatic discharges with-out explosive gas mixtures. *IEEE Transactions on Industry Applications* **40**, (2004) 1467
- [12] *Langer, T., Möckel, D. und Beyer, M.*: Transferred Charge of Brush Discharges in Explosive Gas Atmospheres – a Verification of the Ignition Threshold Limits. *submitted to Journal of Electrostatics* (2010).
- [13] *Langer, T., Markus, D., Lienesch, F. und Maas, U.*: Streamer discharges caused by high-frequency voltage leading to ignition of hydrogen/air mixtures. *Combust. Sci. Technol.* **182**, (2010) 1718–1734
- [14] *Simon, L. H.*: Quantifizierung von Teilentladungen bei hochfrequenter Wechselspannung bis 1 MHz. Diplomarbeit, Technische Universität Braunschweig (2009)
- [15] *Gerlach, U., Johannsmeyer, U., Uehlken, T., Junker, M. und Hennecke, A.*: Deutlich mehr Power in der Eigensicherheit durch Nutzung innovativer Technologien. In: VDI-Berichte 2067, Automation 2009 – Der Automatisierungskongress in Deutschland, (2009) 241–244
- [16] *Gerlach, U., Johannsmeyer, U., und Uehlken, T.*: Eigensichere Speisung hoher Leistung („Power-i“/DART). *Automatisierungstechnische Praxis atp* **1–2**, (2010) 32–39

Mechanisch erzeugte Reib- und Schlagfunken im Vergleich

Felix Welzel¹, Thomas Grunewald², Michael Beyer³,
Rainer Grätz⁴

1 Einleitung

Als mechanisch erzeugte Zündquellen gelten durch Reib- oder Schlagvorgänge entstandene abgetrennte Partikel erhöhter Temperatur bzw. Funken und ggf. zusätzlich entstehende heiße Oberflächen. Für die Entstehung von Funken existieren – abhängig von deren Entstehungsmechanismus – jeweils einige Grenzwerte, die jedoch bisher nicht vergleichbar waren. Ziel dieser Untersuchung war es, die Funkenentstehung sowie insbesondere die Zündwirksamkeit von mechanisch erzeugten Reib- und Schlagfunken gegenüber explosionsfähigen Wasserstoff/Luft-Gemischen unter möglichst ähnlichen Randbedingungen zu vergleichen und deren Unterschiede und Gemeinsamkeiten aufzuzeigen.

2 Mechanische Reib- und Schlagfunken

Aus einer Reibstelle können durch Verformungs- und insbesondere Abtrennarbeit Partikel erhöhter Temperatur herausgerissen werden und anschließend unter bestimmten verfahrenstechnischen Randbedingungen und abhängig vom Werkstoff zu zündfähigen Funken oxidieren. Die Reibstelle zeichnet sich dabei häufig durch eine konstante Relativgeschwindigkeit v sowie eine konstante Flächenpressung p_A zwischen den Reibpartnern aus. Durch die in der Reibstelle ablaufenden tribologischen Prozesse kann der Reibkoeffizient f zeitlich variieren. Um die dynamische Bestimmung des Reibkoeffizienten in dieser Arbeit zu ersparen, wird hier ein konstanter Reibkoeffizient von $f = 1,0$ verwendet. Die zeitlich dann konstante, flächenbezogene Leistungsdichte $q = v \cdot p_A \cdot f$ ist für eine Reibsituation charakteristisch. Die Dauer des Kontaktes variiert zwischen wenigen Sekunden und einigen Minuten.

Treffen zwei Bau- oder Geräteteile betriebsbedingt oder durch Betriebsstörung in Form eines Schlages aufeinander, so kann man zwischen einem stumpfen oder streifenden Schlag unterscheiden. Der streifende Schlag ist der energiereichste Schlag, da durch den spitzen Winkel zwischen Schlagbolzen und Schlagplatte sowohl Schlag- als auch Reibvorgänge wirken und

gleichzeitig hohe Flächenpressungen entstehen. An der Schlagstelle können durch teilweise sehr hohe Verformungs- und Abtrennarbeit Partikel erhöhter Temperatur herausgerissen werden, die u. U. zu zündfähigen Funken oxidieren. Die Dauer eines Schlagvorganges vom Beschleunigen des Schlaghebels bis zur Oxidation bzw. möglichen Explosion des Prüfgemisches durch die Funken beträgt rund 0,1 s. Der rein mechanische Abtrennvorgang der Partikel bis zur Zündung beträgt (vom Abtrennen der Partikel bis zur Zündung) nur etwa 0,01 s. Da verfahrensbedingt weder die Relativgeschwindigkeit noch die Flächenpressung während des Schlagvorganges konstant gehalten werden können, wird ein Schlag durch seine kinetische Schlagenergie charakterisiert. Die durch die Verformungs- und Abtrennarbeit in die Partikel eingebrachte Wärmemenge zeigt sich in der Starttemperatur der abgelösten Partikel, sie reicht trotz Überschreitens der Zündtemperatur der meisten Brenngas/Luft-Gemische jedoch nur selten zur Zündung eines explosionsfähigen Brenngas/Luft-Gemisches aus, da die Lebensdauer und der Energieinhalt zu gering sind. Durchlaufen diese Partikel einen Oxidationsprozess, spricht man von mechanisch erzeugten Funken [1]. Sie erreichen dadurch ein deutlich höheres Temperaturniveau und können das Gemisch dann mit einer deutlich höheren Zündwahrscheinlichkeit zur Explosion bringen.

3 Literaturübersicht

Die Mindestschlagenergie für die Entstehung zündfähiger Stahl-Schlagfunken liegt bei $W = 3 \text{ Nm}$ [2]. In weitergehenden, neueren Untersuchungen bestätigte sich dieser Wert. Ferner wurden die explosionsfähigen Atmosphären der charakteristischen Referenz-Brenngase der IEC-Explosionsgruppen differenziert untersucht [3, 4]. Erstmals können für die homogene Werkstoffkombination ferritischen Stahls für alle Referenz-Brenngas/Luft-Gemische der Explosionsgruppen gemäß Norm [5] die Zündwahrscheinlichkeiten in Abhängigkeit von der kinetischen Schlagenergie fast stufenlos angegeben werden. Ferner wurden die Randbedingungen

¹ Dipl.-Phys. Felix Welzel, Mitarbeiter der PTB-Arbeitsgruppe „Zündgefahren moderner Energieversorgungssysteme“, felix.welzel@ptb.de

² Dipl.-Ing. Thomas Grunewald, Mitarbeiter der BAM-Arbeitsgruppe „Explosionsschutz und Risikobewertung“, thomas.grunewald@bam.de

³ Dr.-Ing. Michael Beyer, Leiter der PTB-Fachbereichs „Zündquellensicherheit“, michael.beyer@ptb.de

⁴ Dr.-Ing. Rainer Grätz, Leiter der BAM-Arbeitsgruppe „Explosionsschutz und Risikobewertung“, rainer.graetz@bam.de

für die Zündwahrscheinlichkeit wie Oxidationsverhalten, Temperatur, Größe, Lebensdauer und Anzahl der Partikel vom Abtrennen durch einen Schlagvorgang bis zur möglichen Explosion untersucht und sind bereits in mehrere europäische Grund- und Produktnormen des Explosionsschutzes sowie in die EX-RL bzw. TRBS 2152 eingeflossen.

Für die minimale Relativgeschwindigkeit zwischen zwei Reibpartnern wurde der Wert $v = 1,0$ m/s ermittelt, unterhalb der bei üblichen Stahlwerkstoffen keine zündwirksamen Funken oder heißen Oberflächen entstehen [6]. Die Abhängigkeit von Werkstoffeigenschaften sowie Flächenpressung auf die Funkenentstehung wurde in jüngeren Forschungsarbeiten untersucht. Hier konnten ebenfalls notwendige, minimale Temperaturen für die Funkenentstehung in homogenen Werkstoffkombinationen bestimmt werden. So wurde für unlegierten, ferritischen Stahl eine minimale Temperatur von 400 °C, für Edelstahl von 650 °C bestimmt [7]. In Fällen sehr hoher Flächenpressungen ($p_A > 10$ N/mm²) konnten Zündungen auch bereits bei $0,7$ m/s beobachtet werden [8].

4 Apparaturen

Die Schlagfunkenapparatur besteht aus einem zu einer Seite offenen Zylinderabschnitt mit innen liegendem Schlaghebel und Aufnahmevorrichtung des Schlagbolzens sowie ebenfalls innen liegender Schlagplatte (Bild 1). Der Schlagbolzen besteht aus $\varnothing 10$ mm Rund-Vollmaterial mit einer 90° -Kegelspitze, die mit einer $\varnothing 6$ mm ebenen Fläche abgeflacht ist. Bei der hier verwendeten großen Schlagfunkenmaschine wird die Vorspannkraft über eine Torsionsfeder aufgebracht. Um alle Einflussparameter wie z. B. Dämpfungen durch die großen Lagerungen mit

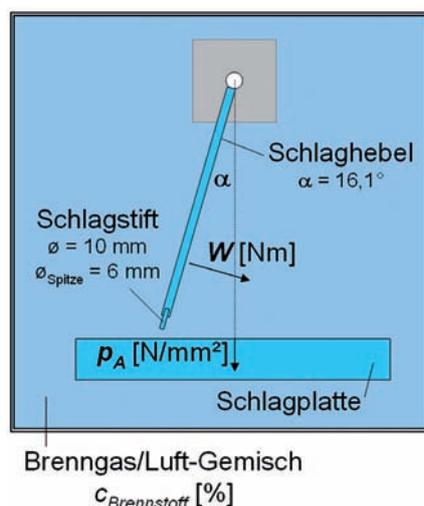


Bild 1:
Schematische Darstellung der Schlagfunkenmaschine in der BAM

zu erfassen, wurde zur Kalibrierung u. a. die Relativgeschwindigkeit des Schlaghebels unmittelbar vor dem Aufsetzen auf die Schlagplatte mit Hilfe eines schnell ansprechenden Lichtschrankenpaares gemessen. Das Spektrum der kinetischen Schlagenergien der großen Schlagfunkenmaschine kann in relativ kleinen Stufen den Bereich von $W = 31$ Nm bis 277 Nm abdecken. Weitere Schlagfunkenmaschinen können den Bereich der kinetischen Schlagenergie unterhalb von 10 Nm abdecken.

Hochgeschwindigkeitsaufnahmen im abgedunkelten Raum dienen zur Auswertung u. a. des Abtrennvorgangs und des Partikelverhaltens. Das Versuchsgefäß kann für Zündversuche mit einer durchsichtigen Berstfolie verschlossen werden. Die Art des Brenngases sowie seine Konzentration sind frei wählbar.

Die Versuchsanordnung der Reibfunkenapparatur wird über einen Reibstift realisiert, der auf die Umfangsseite einer rotierenden Reibscheibe mit konstanter Kontaktkraft gedrückt wird (Bild 2). Diese Anordnung befindet sich in einer druckfesten Explosionskammer, die mit einem Brenngas/Luft-Gemisch beliebiger Konzentration befüllt werden kann.

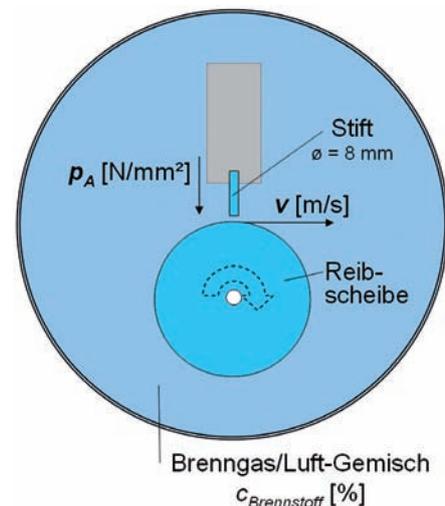


Bild 2:
Schematische Darstellung der Reibfunkenapparatur in der PTB

Zur Beobachtung der Vorgänge an der Reibstelle sowie der Partikel werden die Versuche mittels einer Hochgeschwindigkeitskamera aufgezeichnet. Über die Auswertung der Videosequenzen können die Funkenbildung, die Zündursache sowie der Zündort festgestellt werden. Zur Temperaturmessung in der Reibstelle wird über eine Bohrung längs der Stiftmitte ein Thermoelement in der Reibstelle platziert und während des Versuches mit dem Stift zusammen abgerieben. Durch verschmelzendes Material bleibt jedoch eine elektrisch leitende Verbindung der Thermoelementleiter erhalten.

5 Lösungsansatz

Für die vergleichenden Untersuchungen werden ausschließlich homogene Werkstoff-Kombinationen unlegierter, ferritischer Stähle verwendet (Werkstoff-Nr. 1.0038, 1.0570). Zur Vergleichbarkeit wurden die Randbedingungen der Schlagfunkenapparatur als Referenz verwendet, da Schlagvorgänge in ihrem zeitlichen und mechanischen Ablauf nicht bzw. nur bedingt veränderbar sind. Auch verfahrenstechnisch ist ein Schlagvorgang ein sehr kurzzeitiger Vorgang. Daher wurden für die gemeinsamen Randbedingungen die sehr kurze Dauer eines Schlagvorganges ($t \approx 0,1$ s) bzw. die daraus resultierende einmalige kurze Funkenfarbe ($t \approx 0,01$ s) sowie die Relativgeschwindigkeit und die mit Hilfe der Schlagenergien abgeschätzten Flächenpressungen verwendet (Tab. 1).

Tabelle 1: Reibweg s , Schlaghebelgeschwindigkeit v und Flächenpressung p_A bei Schlagversuchen in Abhängigkeit zur kinetischen Schlagenergie W

Torsionsfeder	W Nm	s mm	v m/s	p_A N/mm ²
K10	31	≈ 45	5,7	1,2
H7=	61	≈ 45	8,1	1,6
H7-	72	≈ 45	8,8	1,9
H7	80	≈ 50	9,3	2,4
J7	126	≈ 55	11,6	4,1
1Z	190	≈ 70	14,3	7,8
1V	220	≈ 75	15,4	9,7
1V+ _{1Zahn} ¹	277	≈ 75	17,3	12,2

Anm. Die Flächenpressungen wurden unter Vernachlässigung von Reibung, Kaltschweißvorgängen und Materialverlagerungen abgeschätzt.

Die Auftragung dieser vorgegebenen Schlagenergien zeigt, dass die Parameter nicht oder nur teilweise variiert werden können (Bild 3). Dennoch konnten mit den vorgegebenen Daten Versuchsparameter für Vergleichsversuche festgelegt werden. Da der Antrieb der Reibfunkenapparatur aus einer Drehmaschine mit ausgewählten Drehzahlwerten realisiert wird, kann die Relativgeschwindigkeit nicht stufenlos eingestellt werden.

Anschließend wurden mit diesen Parametern in der Reibfunkenapparatur Versuche bei extrem kurzen ($t \approx 1,0$ s) Reibzeiten durchgeführt. Deutlich kürzere Reibzeiten lassen sich derzeit technisch nicht realisieren und entsprechen eher nicht der Industriepaxis. Die Entstehung von Funken in Luft wurde untersucht, Zündversuche wurden in Wasserstoff/Luft-Gemischen unter jeweils atmosphärischen Druckbedingungen durchgeführt. Die in der Reibfunkenapparatur innerhalb einer Sekunde entstandenen Funken werden im Folgenden als Kurzzeit-Reibfunken bezeichnet.

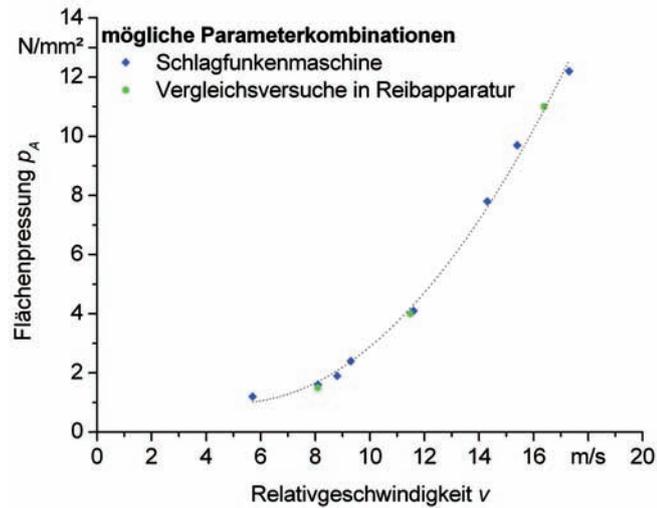


Bild 3: Parametervergleich sowie Wahl der Vergleichsparameter

Ergebnisse

Oxidierter und somit zündfähige Stahl-Schlagfunken können bereits nach etwa 0,01 s erzeugt werden, mit der Reibfunkenapparatur können zündfähige Funken nach 0,18 s erzeugt werden (Bild 4). Damit nimmt die Entstehung von Kurzzeit-Reibfunken deutlich mehr Zeit in Anspruch als die der Schlagfunken. Unterhalb von 72 Nm bzw. $q \approx 17$ W/mm² sinkt die Wahrscheinlichkeit der Erzeugung von oxidierten Funken bei jedem Schlagvorgang. Bei 3 Nm bzw. $q \approx 5$ W/mm² lassen sich keine zündfähigen Stahl-Funken mehr erzeugen. Unterhalb einer Leistungsdichte von $q = 100$ W/mm² nimmt sowohl die Zeit bis zur Entstehung von Kurzzeit-Reibfunken als auch die Zeit zur Entstehung einer heißen Oberfläche deutlich zu.

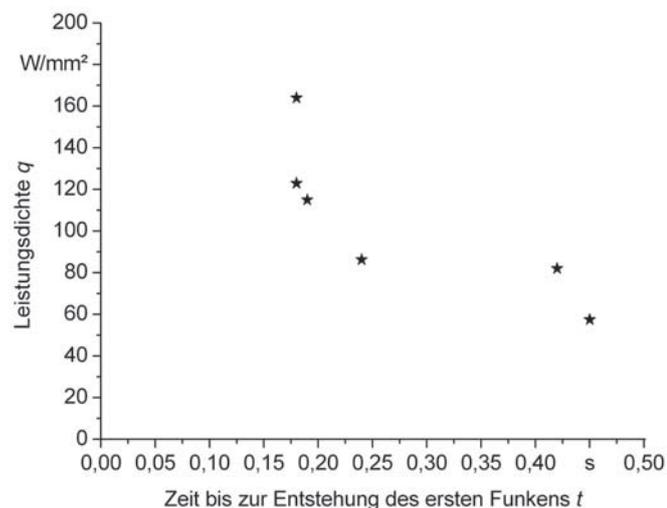


Bild 4: Erzeugung von Kurzzeit-Reibfunken in homogener Stahlkombination (1.0038) in Abhängigkeit von flächenbezogener Leistungsdichte und Zeit bis zur Entstehung des ersten Funkens

Bei den Reibversuchen konnten oxidierte Funken in Wasserstoff/Luft-Gemischen lediglich bei einem Volumenanteil von $c \leq 10,0\%$ erzeugt werden (Tab. 2). Dies zeigt sich auch bei nicht energiereichen Schlagfunken (≤ 190 Nm). Die Wahrscheinlichkeit der Entstehung von Funken sinkt hier bei einem Volumenanteil von $c > 10,0\%$ und konstanter Schlagenergie auf unter 50 % (Bild 5). Im Bereich um das stöchiometrische H_2 /Luft-Gemisch entstehen weder energiereiche Schlag- noch Kurzzeit-Reibfunken. Mechanisch erzeugte Schlagfunken haben ihre größte Zündwahrscheinlichkeit bei Wasserstoff/Luft-Gemischen nahe der unteren Explosionsgrenze, weil dort der höchste Sauerstoff-Restgehalt des Brenngas/Luft-Gemisches vorhanden ist [3, 4]. Dieser ist für das Oxidationsverhalten der abgetrennten Partikel erhöhter Temperatur und somit für die deutliche Steigerung der Zündwahrscheinlichkeit maßgeblich.

¹ Diese Schlagfunkenversuche wurden mit einer anderen Schlagfunkenmaschine durchgeführt, bei der auch geringere Schlagenergien einstellbar sind.

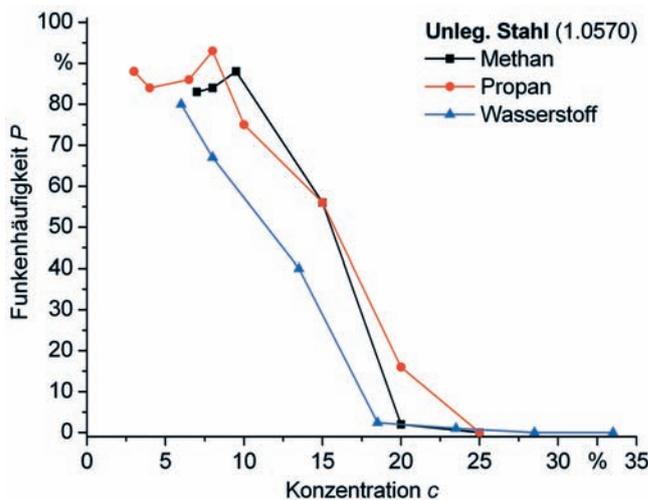


Bild 5: Häufigkeit der Entstehung zündfähiger Schlagfunken in Abhängigkeit der Gemischkonzentration c bei einer Schlagenergie¹ von $W = 10$ Nm.

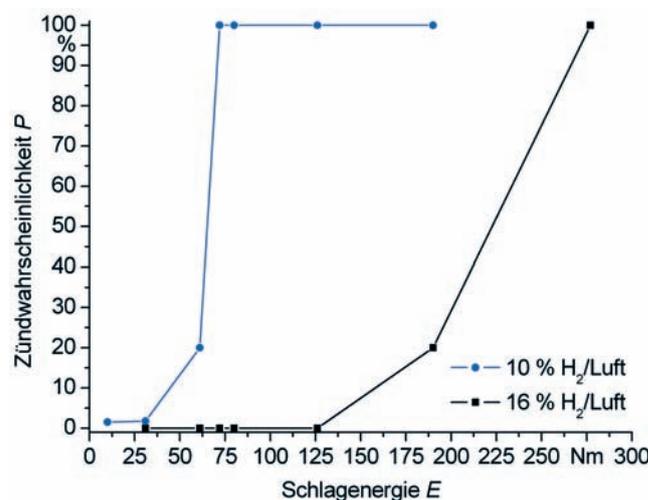


Bild 6: Wahrscheinlichkeit für Zündung durch Schlagfunken bei homogener Kombination (1.0570) in Abhängigkeit der Schlagenergie W

Bezüglich des Zündmechanismus zeigte sich, dass teilweise mehrere Schlagfunken (bis zu fünf) aus einem einzigen Schlagvorgang das Wasserstoff/Luft-Gemisch gleichzeitig zur Explosion bringen können. Dies konnte bei Zündungen durch Kurzzeit-Reibfunken nicht beobachtet werden. Hier lässt sich ein Unterschied bei den Zündmechanismen erkennen.

Die Wahrscheinlichkeit für eine Zündung durch Schlagfunken nimmt mit zunehmender Schlagenergie zu (Bild 6). Ähnliches kann auch bei der Erzeugung von Kurzzeit-Reibfunken beobachtet werden. Während Schlagfunken auch bei $q \approx 6,8$ W/mm² bzw. $W = 31$ Nm die explosionsfähige Atmosphäre zünden können (Bild 6), ist die Zündung durch Kurzzeit-Reibfunken erst ab Leistungsdichten $q > 100$ W/mm² möglich. War diese Bedingung erfüllt und sind Funken entstanden, so waren die Funken auch in jedem Fall die Zündquelle (Tab. 2).

Bei H_2 -Konzentrationen von $c > 10,0\%$ und Leistungsdichten $q > 100$ W/mm² zünden Stahl-Schlagvorgänge und Reibschlagvorgänge jeweils das Gemisch. Bei Schlagvorgängen waren die Funken, bei den Reibschlagvorgängen die heiße Oberfläche für die Zündung verantwortlich. Die schnellste Zündung durch Reibschlagvorgänge wurde in der Nähe des stöchiometrischen Gemisches detektiert. Die heiße Oberfläche kann in der Schlagfunkenapparatur als Zündquelle prinzipbedingt nicht auftreten. Zündungen durch Schlagfunken bei einem Volumenanteil von 16,0 % H_2 erfolgten erst bei $W = 190$ Nm bzw. $q \approx 112$ W/mm². Bei energiereichen Schlagvorgängen ≥ 190 Nm sind abgetrennte Stahl-Schlagfunken aufgrund des hohen Energieinhalts durch die steigende Verformungs- und Abtrennleistung immer weniger auf die für die Explosion eines Brenngas/Luft-Gemisches durch die Zündquelle mechanisch erzeugte Funken zündwilligste Gemischzusammensetzung angewiesen.

Die Temperaturmessungen in der Reibstelle bei $c = 8,5\%$ H_2 in Luft und verschiedenen Leistungsdichten konnten der Entstehung von oxidierten Kurzzeit-Reibfunken maximale Temperaturen von $T > 400$ °C zugeordnet werden. Dies steht – trotz der kurzen Reibzeit – im Einklang

Tabelle 3: Messunsicherheit der wichtigsten Parameter

Parameter	Symbol	rel.	abs.
Relativgeschwindigkeit	Δv	rel.	1,3 %
Flächenpressung	Δp_A	rel.	2,2 %
Schlagenergie	ΔW	rel.	8,2 %
Reibweg	Δs	abs.	5 mm
Zeit	Δt	abs.	8 ms
Konzentration	Δc	abs.	0,02 %
Temperatur	ΔT	abs.	2 °C

Tabelle 2:
Zündung durch Kurzzeit-Reibfunken bei homogener Kombination (1.0038) und einer Reibzeit von $t = 1,0$ s

Brenngas % H ₂	v m/s	p _A N/mm ²	q W/mm ²	T _{max} °C	Funken s	Zündung s	Zündquelle
8,5	8,1	1,5	12	54	–	–	-
8,5	11,5	4,0	46	430	0,56	–	-
8,5	16,4	11,0	180	618	0,46	0,71	Funken
13,5	8,1	1,5	12	¹	–	–	-
13,5	11,5	4,0	46	¹	–	–	-
13,5	16,4	11,0	180	¹	–	0,43	Oberfläche
10,0	11,5	10,0	115	¹	0,10	0,17	Funken
20,0	11,5	10,0	115	¹	–	0,52	Oberfläche
30,0	11,5	10,0	115	¹	–	0,16	Oberfläche
40,0	11,5	10,0	115	¹	–	0,76	Oberfläche
50,0	11,5	10,0	115	¹	–	1,05	Oberfläche
10,0	16,4	10,0	164	¹	0,80	0,81	Funken
20,0	16,4	10,0	164	¹	–	0,78	Oberfläche

¹ keine Temperaturmessung durchgeführt.

mit Literaturwerten, nach denen die Entstehung von Oxidationsprozessen für abgetrennte Partikel für die homogene Kombination aus unlegiertem Stahl (1.0038) erst oberhalb von 400 °C bis 500 °C einsetzt [7]. Bei Schlagvorgängen in Wasserstoff/Luft-Gemischen zünden nur die oxidierten Funken. Dazu müssen die abgetrennten Partikel erhöhter Temperatur aber ebenfalls die zur Oxidation erforderliche Mindesttemperatur von 400 °C bis 500 °C erreichen.

7 Diskussion

Die höhere Zündwahrscheinlichkeit der Schlagfunken bei geringeren Schlagenergien bzw. Leistungsdichten gegenüber den Kurzzeit-Reibfunken lässt sich mit den unterschiedlichen Mechanismen erklären. Während beim Schlagvorgang relativ hohe Verformungs- und Abtrennarbeit eingetragen wird, ist beim Reibvorgang die Abtrennarbeit dominant.

Diese Verformungs- bzw. Abtrennarbeit hängt in der Schlagfunkenapparatur mit der Schlagenergie sowie dem Winkel zwischen Schlaghebel und -platte zusammen. Mit zunehmender Schlagenergie steigt der Reibweg (Tab. 1) und bei 0° Winkel würde der Schlag zu einem Reib- oder Schleifvorgang. Mit jedem Schlagvorgang wird innerhalb von wenigen Millisekunden eine relativ hohe Energie in die abgetrennten Partikel eingetragen. Somit erfolgen Abtrennvorgang und Eintrag von Energie in die Partikel über die kinetische Schlagenergie.

Bei Reibvorgängen sind mehr Abtrenn- als Verformungsvorgänge zu beobachten. Deshalb ist zu vermuten, dass in Abhängigkeit von der Leistungsdichte die abgetrennten Partikel in den ersten Millisekunden nach dem Beginn des Reibvorganges weniger Energie besitzen als Schlagfunken. Im weiteren zeitlichen Verlauf des Reibvorganges bekommen die abgetrennten Partikel durch die ansteigende Reibstellentempe-

ratur eine immer höhere Ausgangstemperatur. Dadurch – und durch den steigenden Einfluss der Zündquelle heiße Oberfläche – steigt die Zündwahrscheinlichkeit mit der Zeitdauer des Reibvorganges.

Die abnehmende Wahrscheinlichkeit der Entstehung von Reibschlag- und Schlagfunken bei zunehmender H₂-Konzentration lässt sich durch die Wärmeleitfähigkeit erklären. Diese ist bei Wasserstoff im Vergleich zu Luft oder Kohlenwasserstoff-Verbindungen etwa um den Faktor 10 größer. In explosionsfähigen Atmosphären entzieht die hohe Wärmeleitfähigkeit des Wasserstoffs den durch Schlagvorgänge abgetrennten Partikeln schneller Wärme, so dass die Oxidation mit steigendem Wasserstoffgehalt immer weniger wahrscheinlich wird [3]. Die bei Reibvorgängen mit zunehmender Reibzeit steigende Reibstellentemperatur sorgt für eine steigende Zündwahrscheinlichkeit der heißen Oberfläche, die auf Grund ihrer Größe – u. a. auch durch Materialverlagerungen an der Reibstelle – durch die Wärmeleitfähigkeit des Umgebungsmediums weniger beeinflusst wird.

Auf Grund der unterschiedlichen Kontaktzeiten und Mechanismen, die Einfluss auf die jeweilige Zündwahrscheinlichkeit haben, sollte die sinnvolle Bewertung für Schlagfunken mit Hilfe des Energiekriteriums und für Reibfunken mittels eines Leistungskriteriums erfolgen.

8 Zusammenfassung

Die funkenerzeugenden Prozesse der Reib- und Schlagfunken konnten über gezielte Betrachtungen und einen schmalen Bereich der Parameterbreite der jeweiligen Zündquelle verglichen werden. So zeigten Versuche bei einem Volumenanteil von $c \leq 10$ % H₂ und somit sehr kurzen Reibzeiten ($t < 1,0$ s) ähnliche Ergebnisse bezüglich der Funkenentstehung sowie der Zündwahrscheinlichkeiten. Durch die unter-

schiedlichen funkenerzeugenden Mechanismen werden Schlagfunken jedoch schneller und bei geringeren Schlagenergien bzw. bei deutlich geringeren Leistungsdichten erzeugt.

In Wasserstoff/Luft-Atmosphären bis 10 % H₂ sinkt mit geringer werdendem Wasserstoffanteil sowohl bei Kurzzeit-Reib- als auch bei Schlagvorgängen die Zündwahrscheinlichkeit. Bei Konzentrationen über 10 % H₂ steigt nur bei Reibschlagvorgängen die Zündwahrscheinlichkeit. Dies liegt an der Zunahme des Einflusses der heißen Oberfläche bei gleichzeitig sinkender Oxidationsmöglichkeit der heißen Partikel durch die hohe Wärmeleitfähigkeit von Wasserstoff bedingt durch den verminderten Sauerstoffgehalt im Gemisch.

Temperaturmessungen bestätigen trotz der verkürzten Reibzeit Temperaturen von über 400 °C, die zur Entstehung von Funken aus unlegiertem, ferritischem Stahl notwendig sind.

Eine sinnvolle und praxisgerechte Bewertung der Zündwahrscheinlichkeiten erscheint für Schlagfunken über das Energiekriterium und für Reibfunken über das Leistungskriterium möglich.

9 Literatur

- [1] DIN EN 1127-1:2008. Explosionsfähige Atmosphären – Explosionsschutz – Teil 1, Grundlagen und Methodik. Beuth Verlag, Berlin
- [2] F. Schulz, P. Dittmar: Experimentelle Untersuchungen über die Zündfähigkeit von Schlagfunken gegenüber explosiblen gasförmigen Gemischen. In: Arbeitsschutz **10** (1963) 259–266
- [3] T. Grunewald, R. Finke, R. Grätz: Untersuchung zur Zündwahrscheinlichkeit und Datenanalyse zur Erfassung der Einflussgrößen mechanisch erzeugter Stahl-Schlagfunken in explosionsfähigen Brenngas/Luft-Gemischen. BAM Forschungsbericht 292, Berlin, 2010, ISBN 978-3-9813853-0-4
- [4] T. Grunewald, R. Finke: Untersuchungen zur statistischen Zündwahrscheinlichkeit mechanisch erzeugter Schlagfunken im explosionsgefährdeten Bereich. In: Chemie Ingenieur Technik **81** (2009) 1639–1651
- [5] DIN EN 60079-0:2010. Explosionsfähige Atmosphäre. Teil 0: Geräte – Allgemeine Anforderungen. Beuth Verlag, Berlin
- [6] W. Bartknecht: Die Zündwirksamkeit von mechanisch erzeugten Funken und heißen Oberflächen. Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz, Forschungsbericht Fb 572. Wirtschaftsverlag NW, Bremerhaven, 1989
- [7] T. Ott., Welzel, F., Beyer, M., Klages, C.-P.: Temperaturen und Funkenentstehung bei Trockenreibung zwischen metallischen Reibpartnern. In: Chemie Ingenieur Technik **81** (2009) 159–165
- [8] Proust, Ch., Hawksworth, S., Rogers, R. L., Beyer, M., Lakić, D., Raveau, D., Hervé, P., Pina, V., Petitfrère, C., Lefebvre, X.: Development of a method for predicting the ignition of explosive atmospheres by mechanical friction and impacts (MECHEX). In: J Loss Prev **20** (2007) 349–365

Zündgefahrenbewertung von PEM-Brennstoffzellen hinsichtlich innerer explosionsartiger Verbrennungsreaktionen

Thomas Horn*

Einleitung

Der Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzelle (PEM-BZ) werden in der Anwendung als dezentrale Energieversorgungseinheit zukünftig vielversprechende Marktchancen eingeräumt. Um die Vorteile dieser innovativen Technologie auch in explosionsgefährdeten Bereichen, wie beispielsweise in der Prozessindustrie, zu nutzen, ist die Entwicklung eines Explosionsschutzkonzeptes notwendig.

Grundsätzlich kann dem Energiewandler nach den Maßstäben des Explosionsschutzes keine inhärente Sicherheit unterstellt werden. Die Komponenten sind während des Betriebes degradativen Einflüssen ausgesetzt [1, 2]. Dies kann zur Aufhebung von sicherheitsrelevanten Funktionen, wie beispielsweise der Gasseparation oder der elektrischen Isolation, führen. Die Bildung explosionsfähiger Gemische als auch das Vorhandensein einer wirksamen Zündquelle innerhalb einer PEM-BZ sind grundsätzlich denkbar. Dies führt zu der Notwendigkeit, die in diesem Zusammenhang auftretenden Fehlerszenarien zu identifizieren und hinsichtlich ihrer Zündgefahr zu bewerten. Eine umfassende Zündgefahrenbewertung stellt für diese neuartige Technologie die Grundlage bezüglich der Entwicklung eines Explosionsschutzkonzeptes dar.

Methodik

In der Methodik des Explosionsschutzes werden zur Wahrung der Risikoproportionalität innerhalb von explosionsgefährdeten Bereichen [3] nur Betriebsmittel mit einem ausreichend hohen Schutzniveau zugelassen. Die Höhe des Schutzniveaus ist an die Gerätekategorie gebunden und beschreibt die Güte des Zündschutzes. Die

Tabelle 1:
Zuordnung des Geräteschutzniveaus zu der Gerätekategorie [4].

	Gerätekategorie		
	1	2	3
Schutzniveau	sehr hoch	hoch	normal
Auftrittswahrscheinlichkeit	sehr selten	selten	gelegentlich

Zuordnung (Tab. 1) erfolgt entsprechend der europäischen Richtlinie [4], aus der sich die qualitativen Wahrscheinlichkeitsaussagen für die Auftrittswahrscheinlichkeit ableiten lassen.

Die Vorgehensweise bei der Durchführung der Zündgefahrenbewertung verdeutlicht Bild 1 (vgl. auch [5]). In diesem Bericht wird die Methodik am Beispiel der Zündquelle – Zünddurchschlag durch die äußere Umschließung der Brennstoffzelle – erläutert.

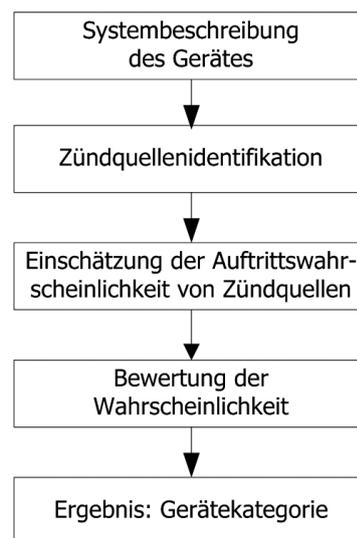


Bild 1:
Ablaufdiagramm zur Zündgefahrenbewertung.

Zündquellenidentifikation

Hinsichtlich der Identifikation wirksamer Zündquellen erweist sich eine deduktive Vorgehensweise in Anlehnung an die Fehlerbaummethode [6] als zielführend. Aufgrund von theoretischen Überlegungen ergibt sich für den Zünddurchschlag eine Kausalitätskette entsprechend Bild 2. Das unerwünschte Ereignis („Top-Event“) stellt die Entzündung explosionsfähiger Atmosphäre dar. Eine Ursache dafür kann ein Zünddurchschlag durch die äußere Umschließung der Brennstoffzelle in Form heißer Gase oder Flammen darstellen, welche durch eine explosionsartige Verbrennungsreaktion innerhalb der Brennstoffzelle initiiert wird. Eine Explosion

* Dr.-Ing. Thomas Horn,
PTB-Arbeitsgruppe
„Zündgefahren moderner Energieversorgungssysteme“
thomas.horn@ptb.de

findet wiederum nur statt, wenn eine wirksame Zündquelle sowie ein explosionsfähiges Gemisch vorliegen.

Untersuchungen an Brennstoffzellen-Testanordnungen zeigen, dass beim Auftreten einer explosionsartigen Verbrennungsreaktion von der Entzündung einer die Brennstoffzelle umgebenden explosionsfähigen Atmosphäre ausgegangen werden muss (vgl. [7]). Einen unmittelbaren Einfluss auf die Auftrittswahrscheinlichkeit des „Top-Events“ haben folglich die beiden untersten logisch UND-verknüpften Ereignisse des Fehlerbaums.

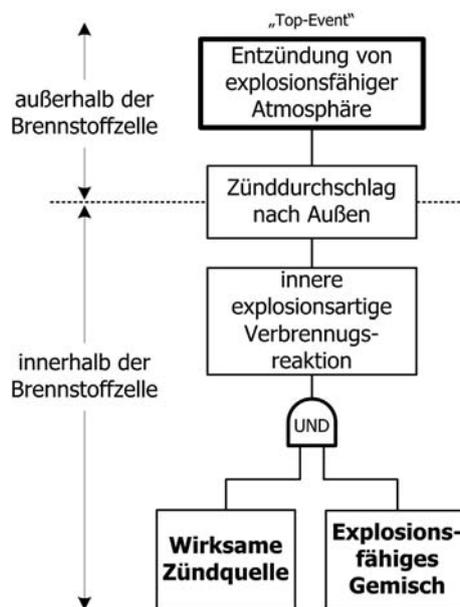


Bild 2:
Vereinfachte Fehlerbaumstruktur für den Zünddurchschlag.

Einschätzung der Auftrittswahrscheinlichkeit

Um die Auftrittswahrscheinlichkeit eines explosionsfähigen Gemisches und einer wirksamen Zündquelle einschätzen zu können, ist vorerst eine Erweiterung der Datengrundlage notwendig. Dies führt zu experimentellen Untersuchungen hinsichtlich der Zündwilligkeit von H_2 /Luft-Gemischen sowie der Zündfähigkeit von Zündquellen innerhalb einer Brennstoffzelle.

Zur Untersuchung der Zündwilligkeit von H_2 /Luft-Gemischen werden Brennstoffzellen-Testanordnungen im Innern mit Miniaturelektroden präpariert. Der elektrische Zündfunke für die Initiierung einer Fremdzündung wird mittels eines Hochspannungsimpulses erzeugt. Die Simulation des Fehlerszenarios eines Gasübertrittes kann auf zwei verschiedene Arten erfolgen, zum Einen über die gezielte Perforation der Membran-Elektroden-Einheit, zum Anderen ist das Nachstellen einer Leckage durch die direkte Einspeisung von H_2 /Luft-Gemisch in

den Anoden- oder Kathodenraum der Brennstoffzelle möglich. Beide Vorgehensweisen führen bezüglich der Zündwilligkeit von H_2 /Luft-Gemischen zu äquivalenten Ergebnissen. Während des Brennstoffzellenbetriebes kann eine explosionsartige Verbrennungsreaktion nur bei gaseingangsnaher Fremdzündung detektiert werden. Einen Erklärungsansatz liefert die Gegebenheit, dass mit zunehmender Weglänge durch die Flussfeldstruktur der Separatorplatten die Feuchte und der Stickstoffanteil durch die direkte exotherme Umsetzung des H_2 /Luft-Gemisches steigt. In Richtung Gasausgang führt dies demzufolge zu einer zunehmenden Inertisierung respektive zu einer steigenden Zündunwilligkeit des Gemisches.

Innerhalb der Brennstoffzelle können wirksame Zündquellen in Form heißer Oberflächen auftreten. Diesbezüglich werden beispielsweise die Fehlerszenarien eines elektrischen Kurzschlusses der gegenüberliegenden Elektroden bzw. Separatorplatten, eine direkte exotherme Umsetzung von H_2 /Luft-Gemisch an den chemisch aktiven Schichten der Elektrodenstrukturen oder die Umschaltung in den Elektrolysebetrieb untersucht. Während dieser Fehlerszenarien kann keine innere explosionsartige Verbrennungsreaktion innerhalb der Brennstoffzelle detektiert werden.

Zur systematischen Dokumentation hinsichtlich der Einschätzung der Auftrittswahrscheinlichkeiten von Ereignissen bietet sich eine Matrix an (vgl. Tab. 2).

Zunächst erscheint es zweckmäßig, eine örtliche Differenzierung vorzunehmen, da innerhalb der Brennstoffzelle nicht überall die gleichen Bedingungen vorliegen. Die Komponenten Gasverteiler, Membran-Elektroden-Einheit (MEA) und Gassammler werden in ihre Subkomponenten Separatorplatte, Dichtung und Flussfeldanfang, -mitte und -ende aufgeteilt. Die Einschätzung der Wahrscheinlichkeit einer Zündung von explosionsfähiger Atmosphäre außerhalb der Brennstoffzelle durch einen Zünddurchschlag $p_{i,ZD}$ erfolgt über Schlüsselereignisse. Hier sind die Auftrittswahrscheinlichkeiten von Leckagen p_{Leck} , H_2 /Luft-Gemisch p_{Gem} , explosionsfähigem H_2 /Luft-Gemisch p_{Ex} und zündfähigen heißen Oberflächen innerhalb der Brennstoffzelle p_{hOb} zu nennen. Die Einschätzung erfolgt gemäß Tab. 1 in qualitativer Weise über die Wahrscheinlichkeitsaussagen gelegentlich, selten und sehr selten.

Innerhalb der Brennstoffzelle dürfte es aufgrund der geringen Materialintegrität der Polymermembran im gesamten Bereich des Flussfeldes gelegentlich zu Leckagen kommen. Demzufolge ist die Bildung eines H_2 /Luft-Gemisches an diesem Ort und im Gassammler gleichermaßen einzuschätzen. Die daraus re-

Tabelle 2:
Einschätzung der Auftrittswahrscheinlichkeit eines Zünddurchschlags während des Brennstoffzellenbetriebes.

Komponente	Subkomponente	Auftrittswahrsch. Schlüsselereignis				Auftrittswahrsch. Zündquelle
		p_{Leck}	p_{Gem}	p_{Ex}	p_{hOb}	p_{iZD}
Gasverteiler	Separatorplatte	s. selten	selten	selten	s. selten	s. selten
	Dichtung	selten				
MEA	Flussfeld Anfang	gelegentlich	gelegentlich	gelegentlich	gelegentlich	selten
	Flussfeld Mitte			selten		s. selten
	Flussfeld Ende			selten		s. selten
Gas-sammler	Separatorplatte	s. selten	gelegentlich	selten	s. selten	s. selten
	Dichtung	selten				



sultierende exotherme Reaktion im Bereich des Flussfeldes beeinflusst die Auftrittswahrscheinlichkeit heißer Oberflächen p_{hOb} als wirksame innere Zündquelle. Hier wird angenommen, dass jegliches Auftreten eines H_2 /Luft-Gemisches im Bereich der Flussfelder zu einer wirksamen Zündquelle führt. Die Differenzierung zwischen den Wahrscheinlichkeiten eines H_2 /Luft-Gemisches p_{Gem} und eines explosionsfähigen H_2 /Luft-Gemisches p_{Ex} erfolgt auf Grundlage der Erkenntnisse aus den Untersuchungen zur Zündwilligkeit. Da nicht jede mögliche Konstellation eines in der Realität vorkommenden Fehlerszenarios im Labormaßstab exakt nachgestellt werden kann, fallen die Einschätzungen im Vergleich zu den Erkenntnissen aus den experimentellen Untersuchungen teilweise sehr konservativ aus.

Abschließend ergibt die Verknüpfung der Ereignisse – Vorhandensein eines explosionsfähigen Gemisches und einer wirksamen inneren Zündquelle – die Auftrittswahrscheinlichkeit des Zünddurchschlags p_{iZD} für die einzelnen Subkomponenten. Hierbei geht das Ergebnis zweier logisch UND-verknüpfter Ereignisse aus Tab. 3 hervor. Unter Berücksichtigung des dominierenden Terms ist mit dem Auftreten eines Zünddurchschlags demnach selten zu rechnen.

Bewertung und Ergebnis

Die Bewertung ist bei Vorliegen der Einschätzung der Auftrittswahrscheinlichkeit einer Zündquelle lediglich ein formaler Akt. Dem Betriebsmittel wird unter Einbeziehung von Tab. 1 formal eine Gerätekategorie zugewiesen. Als Ergebnis der Zündgefahrenbewertung kann der Brennstoffzelle demzufolge ein Schutzniveau entsprechend eines Gerätes der Kategorie 2 unterstellt werden. Dieses Schutzniveau gilt jedoch nur für die Zündung der externen explosionsfähigen Atmosphäre durch einen Zünddurchschlag. Für eine abschließende Ermittlung der Gerätekategorie sind die Auftrittswahrscheinlichkeiten aller identifizierten wirksamen Zündquellen zu berücksichtigen, was nicht Gegenstand dieses Berichtes ist.

Zusammenfassung

Bei der Entwicklung eines Explosionsschutzkonzeptes für neuartige Technologien wie der PEM-Brennstoffzelle ist die Zündgefahrenbewertung ein integraler Bestandteil. Zur Einschätzung der Auftrittswahrscheinlichkeit der potentiellen Zündquelle – Zünddurchschlag durch die äußere Umschließung – werden die Erkenntnisse aus experimentellen Untersuchungen eingebunden. Zur systematischen Dokumentation der Überle-

Tabelle 3:
Ergebnis der qualitativen Wahrscheinlichkeitsaussagen bei Vorliegen einer logischen UND-Verknüpfung zweier Ereignisse.

Wahrscheinlichkeit	gelegentlich	selten	sehr selten
gelegentlich	selten	sehr selten	(sehr selten)
selten	sehr selten	(sehr selten)	(sehr selten)
sehr selten	(sehr selten)	(sehr selten)	(sehr selten)

gungen wird eine Matrixstruktur gewählt. Das Vorgehen über die Verknüpfung von Schlüsselereignissen ergibt hinsichtlich des Zünddurchschlags ein seltenes Auftreten. Entsprechend kann für die PEM-Brennstoffzelle hinsichtlich dieser Zündquelle ein Schutzniveau der Gerätekategorie 2 unterstellt werden.

Literatur

- [1] *LaConti, A. B.; Hamdan, M.; McDonald, R. C.:* Handbook of Fuel Cells – Fundamentals, Technology and Applications. Volume 3: Fuel Cell Technology and Applications. Chapter 49. Mechanisms of membrane degradation. ISBN: 0-471-49926-9. John Wiley & Sons. 2003
- [2] *Panchenko, A.:* Polymere Electrolyte Membrane Degradation and oxygen reduction in fuel cells: an EPR and DFT investigation. Dissertation. Institut für Physikalische Chemie der Universität Stuttgart. Stuttgart 2004
- [3] DIN EN 60079-10:2004. Elektrische Betriebsmittel für gasexplosionsgefährdete Bereiche – Teil 10: Einteilung der explosionsgefährdeten Bereiche
- [4] Richtlinie 94/9/EG des europäischen Parlaments und des Rates vom 23. März 1994 zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten für Geräte und Schutzsysteme zur bestimmungsgemäßen Verwendung in explosionsgefährdeten Bereichen
- [5] *Beyer, M.:* Zur Methode der Zündgefahrenbewertung für explosionsgeschützte nicht-elektrische Geräte – Unterstützung der Gerätehersteller bei Analyse und Bewertung. Die Ex-Zeitschrift 37/2005 der Stahl Schaltgeräte GmbH. S. 74–81
- [6] DIN EN 61025:2007. Fehlzustandsbaumanalyse (Fault Tree Analysis).
- [7] *Horn, T.:* Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzelle für den Ex-Bereich – Einschätzung der Auswirkungen einer inneren explosionsartigen Verbrennungsreaktion. Tagungsbericht. 12. Kolloquium zu Fragen der chemischen und physikalischen Sicherheitstechnik. S. 11–14. Berlin 2010.

Europäischer Vertrag

Art. 95
regelt den freien Warenverkehr

Richtlinien
für Beschaffenheit
94/9/EG „ATEX 50 Produktrichtlinie“
ATEX 100a
97/23/EG „Druckgeräterichtlinie“
87/40/4/EG „einfache Druckbehälter“

GPSG
Geräte- und Produktsicherheitsgesetz

11. GPSGV (ExVO)
Explosionsschutzverordnung
14. GPSGV
Druckgeräteverordnung
Umsetzung ins nat. Recht

Art. 137
regelt die Mindestvorschriften

Richtlinien
für Betriebsvorschriften
1999/92/EG ATEX 137 Betriebsrichtlinie
ATEX 118

ArbSchG
Arbeitsschutzgesetz

BetrSichV
Betriebsicherheitsverordnung
Arbeitsschutz und Anlageüberwachung

NATIONALE REGELWERKE
TRBS, TRB Staatlicher Ausschuss

Störfallrecht

Richtlinie
96/82/EG Seveso II

BImSchG
Bundesimmissionsschutzgesetz

12. BImSchV
Störfallverordnung §3 (3):
Angaben, Auswirkungen v. Störfälle

SFK, TAA
Staatlicher Ausschuss

Harmonisierte Normen, Regelsammlungen, AD-Merkblätter:

EN 13445 unbefeuerte Druckbehälter
EN 13480 für industrielle Rohrleitungen
DIN EN 1127 Explosionsfähige Atmosphäre
EN 292 und EN 1050
BGR 104, 109, BGI 740, VDI 2263, 3673

DIN EN 14797 Einrichtungen zur Explosionsdruckentlastung
DIN EN 14994 Schutzsysteme zur Druckentlastung
EN 13327 Begriffe für explosionsgefährdete Räume
EN 13463-1 Grundlagen und Anforderungen
AD-2000 Merkblätter

Bild 2:
Überblick zu den Rechtsvorschriften im konstruktiven Explosionsschutz

derungen der EU-Richtlinie 94/9/EG für Geräte und Schutzsysteme zur bestimmungsgemäßen Verwendung in explosionsgefährdeten Bereichen. Jedoch beschränken sie sich auf einzelne Umschließungen, die im Wesentlichen frei von Turbulenz erzeugenden Elementen sind.

Während des Designs sind folgende wesentliche Einflussfaktoren des Explosionsverhaltens bzw. der Entlastungsfläche (A) zu berücksichtigen:

- Auslegungsdruck der Umschließung (P_{red})
- Zustand der explosionsfähigen Atmosphäre (P_0 , T_0 , Konzentrationen)
- Position und Art der Zündquelle
- Explosionskennwerte des Gases (K_G , P_{ex})
- Geometrie der Umschließung (z. B. Länge L , Durchmesser D , Volumen V)
- Anzahl, Maß und Lage Turbulenz erzeugender Einbauten
- Statischer Ansprechdruck (P_{stat})
- Effizienz der Druckentlastungseinrichtung (E_f).

Eine Voraussage, ob eine Explosionsdruckentlastung turbulent erfolgt, ist für die zahlreichen möglichen Parameterkombinationen derzeit nur in unbefriedigendem Maße möglich [1].

Gemäß dem Stand der Technik und nach DIN EN 14994 kann die erforderliche Druckentlastungsfläche unter den Annahmen, dass keine Turbulenz erzeugenden Einbauten vorhanden sind und $L/D < 2$; $P_{stat} < 0,5$ bar; $K_G < 550$ bar m/s; $E_f = 1$; $V < 1000$ m³, mit Hilfe der folgenden halbempirischen Gleichung berechnet werden:

$$A = \left\{ \left[(0,1265 \lg(K_G) - 0,0567) P_{red}^{-0,5817} \right] + \left[0,1754 P_{red}^{-0,5722} (P_{stat} - 0,1 \text{ bar}) \right] \right\} V^{\frac{2}{3}}$$

Das Verfahren zur Bestimmung des maximalen Explosionsdruckes und des maximalen zeitlichen Druckanstieges für Gase und Dämpfe ist in DIN EN 13673 beschrieben. Letzteres dient zur Bestimmung des K_G -Wertes nach dem kubischen Gesetz, welches die Volumenabhängigkeit des Druckanstieges beschreibt [2]:

$$K_G = \frac{dp}{dt} \Big|_{\max} \cdot \sqrt[3]{V}$$

Ergebnisse experimenteller Untersuchungen

Das Explosionsverhalten wurde im Rahmen einer Vorstudie für verschiedene Referenzgemische bei 1, 2, 5 bar (P_1 , P_2 , P_5) untersucht. Die Gemischzusammensetzungen (G_1 , G_2 , G_3) der Methan / Stickstoff / Luft-Gemische wurden so gewählt, dass ein praxisrelevanter Bereich der K_G -Werte abgedeckt wird:

G_1 : 10 Vol.-% CH₄, 90 Vol.-% Luft
 G_2 : 8,5 Vol.-% CH₄, 15 Vol.-% N₂, 76,5 Vol.-% Luft
 G_3 : 8 Vol.-% CH₄, 20 Vol.-% N₂, 72 Vol.-% Luft.

Der Versuchsstand zur Explosionsdruckentlastung in Bild 3 besteht neben einem Gasmischstand und einer 182 kHz schnellen Messtechnik

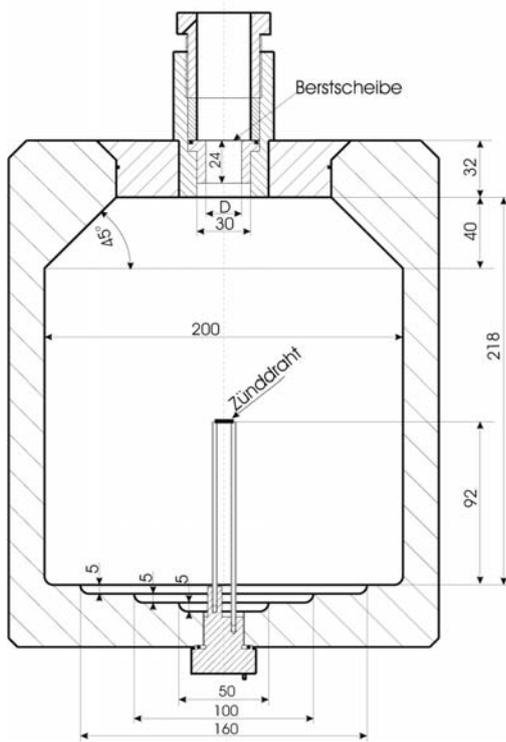


Bild 3: 6 Liter- und 86 Liter-Versuchsbehälter

im Wesentlichen aus einem 6 bzw. 86 Liter-Autoklav (DN300, PN50), pneumatisch gesteuerten Ventilen, einer modifizierten Zündkerze sowie diversen Entlastungsblenden und Berstfolien.

In Bild 4 wird anhand der normierten Druckverläufe das charakteristische Explosionsverhalten für geschlossene Behälter in Abhängigkeit der Anfangskonzentration oder des Anfangsdrucks dargestellt. Es dient nicht nur zur Beurteilung, ob eine laminare Explosion vorliegt, sondern auch als Referenz für zukünftige CFD Simulationen.

Ein bemerkenswertes Ergebnis der Versuche im 6 Liter-Autoklav ist, dass bei größer werdender Entlastungsfläche die zu schützende Apparatur in einen unsicheren Zustand überführt werden kann. Die in Bild 5 dargestellte beispielhafte Versuchsreihe verdeutlicht die Problematik von vermeintlich überdimensionierten Druck-

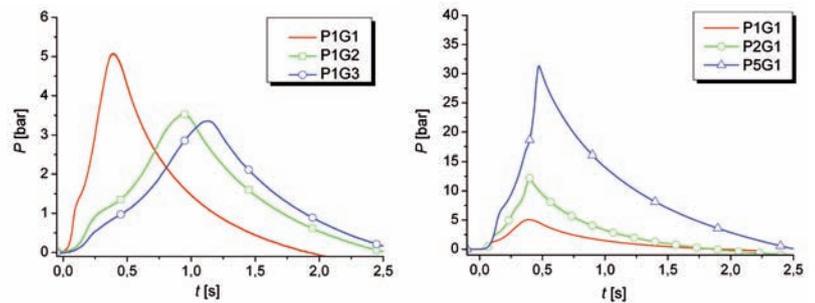


Bild 4: Laminares Explosionsverhalten im geschlossenen 86 Liter-Autoklav

entlastungsflächen. Mit zunehmendem Blendendurchmesser bzw. Entlastungsfläche kann zwar eine größere Entlastungskapazität erreicht werden, jedoch erhöht sich unter den gegebenen Umständen und ab einem Blendendurchmesser von 22 mm auch die Verbrennungsgeschwindigkeit durch Turbulenzbildung. Die Entlastungsblenden selbst können demnach als Turbulenz bildende Einbauten wirken.

Neuere experimentelle Untersuchungen konnten diesen Effekt der turbulenten Explosionsdruckentlastungen bei erhöhtem Anfangsdruck auch im 86 Liter-Autoklav bestätigen.

Der Vollständigkeit halber sei zusätzlich darauf hingewiesen, dass diverse Autoren experimentell nachgewiesen haben, dass das charakteristische Verhalten von turbulenten Explosionsdruckentlastungen auch durch interne Einbauten [3], durch Entlastungsvorgänge selbst [4] aber auch durch externe Einbauten [5] verursacht werden kann.

Welchen Einfluss eingebaute Blenden auf das Explosionsverhalten im geschlossenen Behälter haben können, ist für das Gemisch G1 in Bild 6 dargestellt. Es verdeutlicht die Zunahme der maximalen Druckanstiege bei Verwendung von 10 mm-Lochblenden gegenüber den laminaren Fällen, also ohne Blende. Hierbei erhöht sich der jeweilige K_C -Wert mindestens um den Faktor 10,

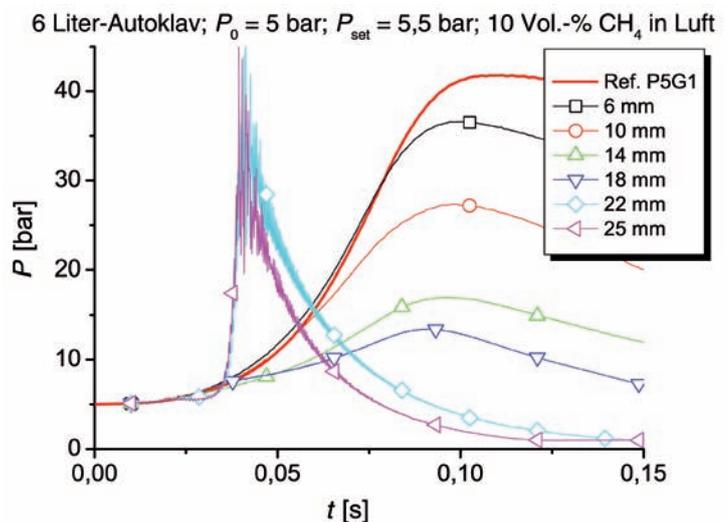


Bild 5: Einfluss der Blendenquerschnitte auf die Explosionsdruckentlastung

wodurch der K_c -Wert 550 bar m/s überschritten wird und die Anwendbarkeit der DIN EN 14994 nicht mehr gewährleistet ist.

Wie sich das Druckentlastungsverhalten im Turbulenzfall im Vergleich zum laminaren Fall drastisch unterscheiden kann, wird in Bild 7 anhand der Druck-Zeit-Verläufe deutlich. Trotz einer Explosionsdruckentlastung ab 1 bar werden im Vergleich zur laminaren Explosion im geschlossenen System kurzzeitig höhere Drücke erreicht. Diese könnten jedoch schon ausreichen, um den zulässigen Behälterdruck P_{zul} zu überschreiten.

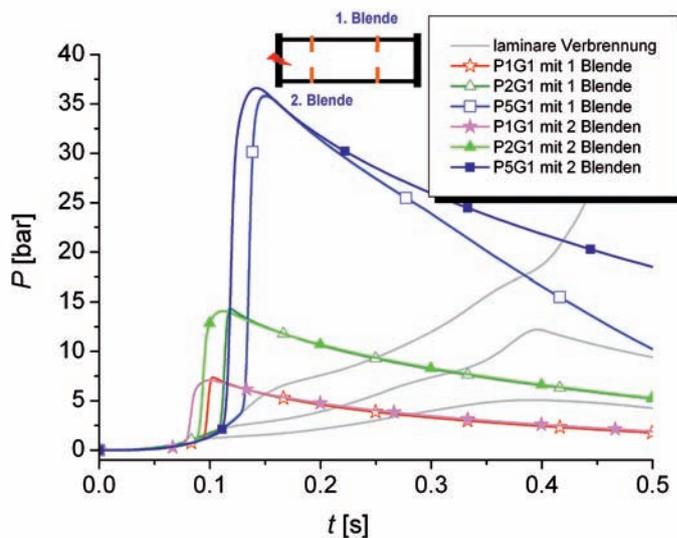


Bild 6: Explosionsverhalten mit und ohne Blenden im geschlossenen 86 Liter-Autoklaven bei unterschiedlichen Anfangsdrücken P_0

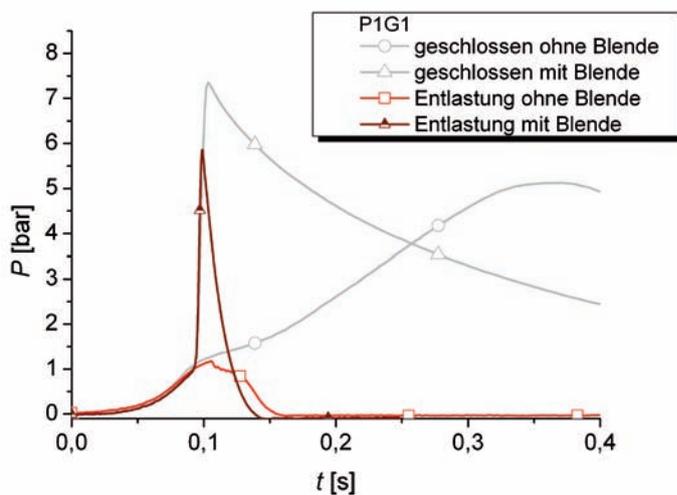


Bild 7: Druck-Zeit-Verläufe bei Druckentlastung mit und ohne Turbulenz bildende Blenden

Zusammenfassung und Ausblick

Zur Bemessung von Druckentlastungseinrichtungen bei Gasexplosionen in Umschließungen existieren derzeit nur wenige wissenschaftlich fundierte Auslegungskriterien, die die konstruktiven Randbedingungen oder Prozessbedingungen der explosionsgefährdeten Anlagenteile ausreichend berücksichtigen. Aus diesem Grund werden in der Praxis häufig stark konservative Annahmen getroffen, die zu erheblichen Überdimensionierungen der Druckentlastungseinrichtungen führen können. Aus sicherheitstechnischer Perspektive können gerade diese vermeintlichen Sicherheitsmargen zu einer erheblichen Beschleunigung des transienten Druckverlaufs und damit eher zu einer Unterdimensionierung führen oder sogar den Übergang von Deflagrationen zu Detonationen begünstigen.

Sowohl Messungen als auch erste Simulationen mit Hilfe von CFD-Modellen begründen die Notwendigkeit weiterer Untersuchungen mit explosionsgefährdeten Gasanlagen.

Da insbesondere bei turbulenten Verbrennungsvorgängen in den Normen Verbesserungspotential herrscht, wird bei der BAM zukünftig verstärkt dieses Thema in Forschungsarbeiten berücksichtigt.

Literatur

- [1] Steen, H.: Handbuch des Explosionsschutzes: Wiley-VCH, 3-527-29848-7, 2000
- [2] BGI747, Sicherheitstechnische Kenngrößen - Ermitteln und Bewerten. vol. Merkblatt R 003. Heidelberg: Jedermann-Verlag, 6/2000
- [3] Hjertager, B. H.: Influence of turbulence on gas explosions. Journal of Hazardous Materials, vol. 9 (1984), (3), pp. 315-346
- [4] Daubitz, R., Schmidt, D., Schröder, V.: Ermittlung von Kenngrößen für die Druckentlastung von Gasexplosionen bei höheren Anfangsdrücken. 9. BAM/PTB-Kolloquium zur chemischen und physikalischen Sicherheitstechnik, Braunschweig, 2001
- [5] Ferrara, G., Willacy, S. K., Phylaktou, H. N., Andrews, G. E., Benedetto, A. D., Salzano, E., Russo, G.: Venting of gas explosion through relief ducts: Interaction between internal and external explosions. Journal of Hazardous Materials, vol. 155 (2008), (1-2), pp. 358-368

Sicherheit bei mikrostrukturierten Reaktoren

Ergebnisse und Schlussfolgerungen aus Untersuchungen am Beispiel von Ethan/Sauerstoff-, Ethen/Sauerstoff- und Ethen/Lachgas-Gemischen

Elisabeth Brandes¹, Hartmut Hieronymus²

Einleitung

Die Mikroverfahrenstechnik (typische innere Abmessungen der Apparaturen < 1000 µm) erfährt zunehmend Interesse für industrielle Anwendungen. Grund hierfür sind verschiedene Vorteile gegenüber konventionellen chemischen Reaktoren wie ein erhöhter Wärme- und Stofftransport und größere spezifische Phasengrenzen [1]. Hierdurch können im Zuge einer Prozessintensivierung höhere Raum-Zeit-Ausbeuten und Selektivitäten und darüber hinaus eine sicherere Prozessführung erreicht werden. Dies trifft vor allem dann zu, wenn als Oxidationsmittel reiner Sauerstoff, Distickstoffmonoxid (Lachgas) oder ähnliche Substanzen mit hohem Oxidationspotential eingesetzt werden. Vielfach wird angenommen, dass Mikroreaktoren inhärent sicher gegenüber Deflagrations- und Detonationsvorgängen sind. Durchmesser der Reaktionskanäle von 0,5 mm und kleiner lassen Flammendurchschläge zumindest bei Stoffen der Explosionsgruppen IIA und IIB für Gemische mit Luft als Oxidationsmittel und Umgebungsbedingungen (ca. 20 °C, ca. 1013 mbar) als ausgeschlossen erscheinen. Für die in der Mikroverfahrenstechnik bevorzugten Reaktionsbedingungen wie erhöhter Druck, erhöhte Temperatur und vor allem Oxidationsmittel mit erhöhtem Oxidationspotential gilt dies jedoch nicht [2].

Es müssen deshalb die apparativen und/oder Systemparameter so ausgelegt werden, dass eine Explosionsausbreitung im Mikroreaktor und insbesondere in angrenzende explosionsgefährdete Bereiche verhindert wird, sofern Brennstoff/Oxidator-Gemische in explosionsfähiger Zusammensetzung eingesetzt werden oder auftreten können. D. h. die Explosionscharakteristika von Brennstoff/Oxidator-Gemischen und ihre Abhängigkeit von den Reaktionsbedingungen wie Druck, Temperatur und Oxidationsmittel müssen bekannt sein.

Werden Oxidationsmittel mit höherem Oxidationspotential als Luft eingesetzt, sind neben den Explosionsgrenzen auch die Explosionscharakteristika Detonationsgeschwindigkeit, Detonationsdruck und Detonationszellularbreite von Bedeutung, da die Anlaufängen für den Defla-

grations-Detonations-Übergang mit steigendem Oxidationspotential und Rohrdurchmesser sinken. Im Falle der bei Mikroreaktoren üblichen Abmessungen sind diese Voraussetzungen erfüllt. Zu klären ist deshalb in erster Linie, welche Grenzdurchmesser der mikrostrukturierten Bauteile in Verbindung mit Systemdruck und -temperatur erforderlich sind, um Explosionen zu unterbinden, wenn explosionsfähige Gemische vorliegen und Zündquellen nicht ausgeschlossen werden können.

Aufschlüsse über die Ausbreitung von Explosionen in Mikroreaktoren können durch verschiedene Untersuchungen gewonnen werden [3, 4]. Unter anderem kann durch die direkte Beobachtung eines Flammendurchschlags durch eine Einzelkapillare mit einem für Mikroreaktoren typischen Durchmesser auf das Explosionsverhalten im Mikroreaktor geschlossen werden. Im Falle zu befürchteter Detonationen können auch Rückschlüsse aus Detonationszellmustern, die bei Detonationsdurchschlägen durch Rohre mit größerem Durchmesser erzeugt werden, genutzt werden, um auf die Ausbreitung von Detonationen in Mikrostrukturen zu schließen.

Direkte Beobachtung des Flammendurchschlags

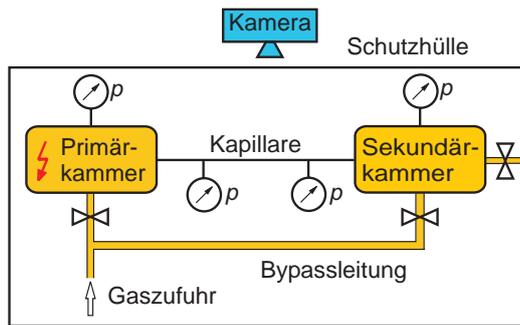
Um zu testen, ob eine Detonationsausbreitung in Mikrostrukturen unter bestimmten Bedingungen möglich ist, wird in einer makroskopischen Primärkammer eine Detonation initiiert, die auf ein Edelstahlkapillarrohr oder eine Glaskapillare geleitet wird. Die Ausbreitung der Detonation wird mit Drucksensoren und/oder optisch (Hochgeschwindigkeitsaufnahmen, Langzeitbelichtung) nachgewiesen.

Bild 1 zeigt schematisch den Versuchsaufbau für diese Untersuchungen. Kapillaren unterschiedlicher Länge und unterschiedlichen Durchmessers können zwischen der Primärkammer, in der die Detonation ausgelöst wird, und der Sekundärkammer montiert werden. Die Edelstahlkapillaren sind an zwei Stellen unterbrochen und mit Druckmessstellen ausgestattet, um die Explosionsausbreitung in der Mikrostruktur zu verfolgen. Drucksensoren

¹ Dr. Elisabeth Brandes, Leiterin der PTB-Arbeitsgruppe „Kenngroßen des Explosions-schutzes“, elisabeth.brandes@ptb.de

² Dr. Hartmut Hieronymus, BAM-Arbeitsgruppe „Explosionsdynamik“, hartmut.hieronymus@bam.de

Bild 1:
Schematische Darstellung der Kapillar-Detonationsstrecke



befinden sich ebenfalls an der Primär- und auch an der Sekundärkammer. Dies erlaubt es, zu beobachten, ob eine Explosion in dem der Mikrostruktur nachgeschalteten makroskopischen Raum gezündet wird und sie im positiven Fall zu quantifizieren. Die Druckmessung wird mit piezoelektrischen Drucksensoren mit einem Messbereich bis 100 MPa durchgeführt. Die explosionsfähigen Gemische werden entweder statisch in einem Autoklaven nach der Partialdruckmethode oder dynamisch mit Hilfe von Massendurchflussreglern, kalibriert für des jeweilige Gas, und einer Mischeinrichtung zur Homogenisierung der Gemische hergestellt. Im Falle der dynamischen Gemischerzeugung wird als Mischeinrichtung eine Detonationssicherung gewählt, die gleichzeitig auch als Sicherungselement gegen einen Detonationsdurchschlag in die ungewünschte Richtung dient.

Als Zündquelle in der Primärkammer dient entweder ein Draht, der durch Kondensatorentladung mit einer elektrischen Energie von 10 J zur Explosion gebracht wird, oder eine handelsübliche Zündkerze mit einer elektrischen Energie von ca. 8 J. Die Druck-Zeit-Kurven sämtlicher Drucksensoren werden aufgezeichnet. Diese Versuchseinrichtungen erlauben es, durch direkte Messungen die Grenzparameter

- Durchmesser der mikrostrukturierten Bauteile,
 - Druck und
 - Temperatur,
- für die ein Durchschlag einer Detonation gerade nicht erfolgt, festzulegen

Bild 2:
Photographische Beobachtung eines Durchschlags einer Ethan/ O_2 -Detonation bei 1 bar und Umgebungstemperatur durch eine ca. 0,5 m lange Glaskapillare mit 0,5 mm Durchmesser

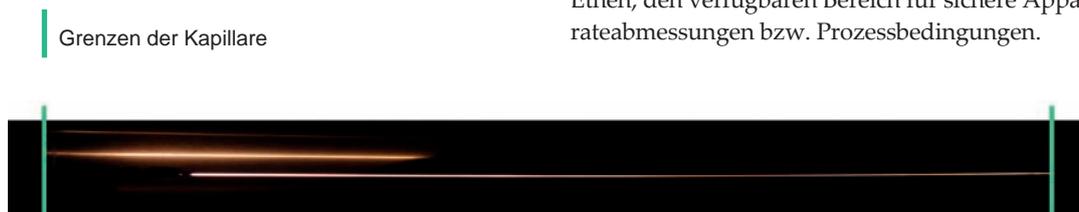


Bild 3:
Nichtdurchschlag einer stöchiometrischen Ethan/ O_2 -Detonation bei 0,16 bar durch eine ca. 39 cm lange Glaskapillare mit 0,5 mm Durchmesser



Optische Beobachtungen

Bild 2 zeigt einen Detonationsdurchschlag durch eine 0,5 mm-Glaskapillare von 0,5 m Länge aufgenommen im Serienbildmodus einer Fotokamera (Belichtungszeit von 1/60 s) für ein stöchiometrisches Ethan/Sauerstoff-Gemisch. Da eine Detonationswelle bei einer typischen Geschwindigkeit von 2000 m/s in 1/60 s ca. 33 m zurücklegt, ist sie nur auf einem einzigen Bild der Photoserie als leuchtender Strich zu erkennen. Die leuchtende Spur der Detonation ist - neben einigen Reflektionen - klar erkennbar und reicht von Anfang der Glaskapillare bis ans Ende, d. h. die Detonation hat in diesem Fall die Kapillare vollständig durchlaufen.

Reduziert man den Startdruck schrittweise, lässt sich bei konstanter Temperatur für eine gegebene Kapillare ein Grenzdruck bestimmen, bei dem die Reaktion schließlich nicht mehr durch die gesamte Kapillare läuft. Für stöchiometrische Ethan/Sauerstoff-Gemische ist dies bei 0,16 bar der Fall. Wie Bild 3 zeigt, erreicht die schwache Leuchterscheinung nicht mehr das Ende der Glaskapillare.

Auf gleiche Weise lassen sich auch Grenzdurchmesser für gegebene Temperaturen und Drücke ermitteln.

Analyse mittels Drucksensoren

Bild 4 zeigt am Beispiel von stöchiometrischen Ethen-Sauerstoff bzw. Ethen-Lachgas-Gemischen bei Raumtemperatur die Korrelation zwischen dem Kapillargrenzdurchmesser und dem Anfangsdruck.

Die erhaltenen Grenzdurchmesser zeigen eine indirekte Proportionalität zum Anfangsdruck. Die sicherheitstechnisch unbedenklichen Bedingungen liegen jeweils oberhalb der die Messpunkte verbindenden Linien für das jeweilige Gemischsystem.

Es ist auch ersichtlich, dass die Grenzdurchmesser bei einem konstanten Anfangsdruck für die Mischungen Ethen-Lachgas stets größer sind als für die Mischungen Ethen-Sauerstoff. D. h. ein Wechsel zu dem etwas weniger reaktiven Oxidator Lachgas erweitert, zu mindest im Falle von Ethen, den verfügbaren Bereich für sichere Apparat-Abmessungen bzw. Prozessbedingungen.

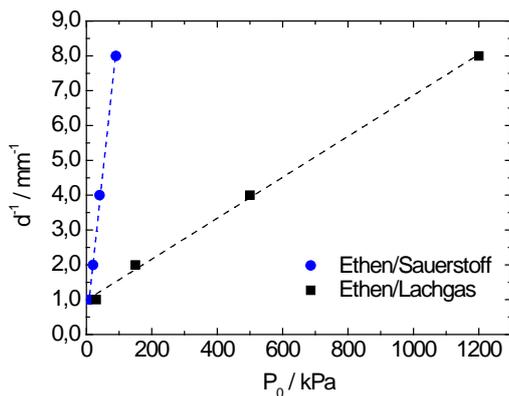


Bild 4: Reziproker Grenzdurchmesser d^{-1} über dem Anfangsdruck P_0 stöchiometrischer Ethen-Sauerstoff- und Ethen-Lachgas-Gemische nach Zündung bei Raumtemperatur

Rückschlüsse aus Detonationszellmustern

Detonationszellmuster lassen sich auf einer geeignet präparierten (berußten) Innenfläche eines Rohres nach Durchlauf einer Detonation durch das Rohr abbilden. Ihre Ursache ist die Überlagerung der eigentlichen Detonationsstoßwelle durch transversale Wellen. Da diese Transversalwellen für die stabile Fortpflanzung der Detonation notwendig sind, besagt eine einfache Überlegung, dass eine Detonation nur dann ein Rohr durchlaufen kann, wenn wenigstens eine Detonationszelle in den Rohrumfang „passt“. Für das Verhältnis zwischen Rohrdurchmesser d und Detonationszellbreite λ muss daher im Falle eines Detonationsdurchschlages gelten:

$$\pi \cdot d > \lambda \Rightarrow d > \frac{\lambda}{\pi}$$

Üblicherweise werden Detonationszellbreiten in Rohren gemessen, die einen wesentlich größeren Innendurchmesser aufweisen als in Mikroreaktoren üblich [4, 5]. Bei Gültigkeit dieser als „ $\lambda/3$ -Regel“ bekannte Beziehung [4, 6] auch für in der Mikroverfahrenstechnik übliche Abmessungen ist die Ermittlung des Grenzdurchmessers $d_G(p, T)$ bei konstantem Druck und konstanter Temperatur, bei dem es gerade nicht mehr zu einer detonativen Reaktionsausbreitung durch das komplette Rohr kommen kann, mit hinreichender Genauigkeit aus einer einzigen Messung bei größerem Rohrdurchmesser möglich. Sofern auch die Korrelation der Zellbreite mit dem Anfangsdruck, der Temperatur und der Zusammensetzung des explosionsfähigen Gemisches bekannt ist, lassen sich somit die notwendigen Grenzparameter für Reaktionen in Mikroreaktoren ermitteln. Genau genommen lässt sich mit der $\lambda/3$ -Regel der Durchmesser ermitteln, bei dem die Ausbreitung einer stabilen Detonation gerade noch möglich ist. Dieser größte Durchmesser bezüglich der stabilen

Detonationsausbreitung liegt jedoch in unmittelbarer Nähe des Grenzdurchmessers, unterhalb dessen die Detonationsausbreitung vollständig unterdrückt wird, so dass durch einen Sicherheitszuschlag die unterschiedlichen Modi der Ausbreitungscharakteristik einer detonativ verlaufenden Explosion abgedeckt werden können

Der für die Zellbreitenmessung eingesetzte Versuchsaufbau besteht ähnlich dem Messaufbau zur Kapillar-Detonationstrecke aus einer Primärkammer, in der die Detonation ausgelöst wird, einem sich anschließenden spiralförmigen Stahlrohr von 10 mm Innendurchmesser und 4,8 m Länge zur Stabilisierung der Detonation (Detonationsstrecke), einer Analyse-Einheit zur Aufzeichnung der Detonationsparameter (Detonationsdruck, Detonationsgeschwindigkeit und Detonationszellgröße) und einer Detonations-Auslaufstrecke, um die Detonation ohne Rückwirkung auf deren Analyse abklingen zu lassen. Die Analyse-Einheit besteht aus vier in jeweils genau 10 cm Abstand angebrachten piezoelektrischen Druckaufnehmern und daran anschließend berußte Halbschalen von 10 cm Länge.



Bild 5: Halbschalen zur Bestimmung der Detonationszellbreiten (obere Halbschale berußt)

Als Zündquelle wird eine handelsübliche Zündkerze verwendet. Die Gemischaufbereitungseinheit bestehend aus Massendurchflussreglern, kalibriert für das jeweilige Gas, und einer Mischeinrichtung zur Homogenisierung der gewünschten Gemische. Als Mischeinrichtung wurde eine Detonationssicherung eingesetzt, die gleichzeitig auch als Sicherungselement gegen einen Detonationsdurchschlag in die ungewünschte Richtung dient. Die Auswertung erfolgt, indem Länge und Breite der Detonationszellen des fotografierten Detonationszellmusters mittels eines Abstandsmessprogramms ausgewertet werden.

Die gesamte Messstrecke ist in einem Wärmeschrank aufgebaut, um auch Messungen bei erhöhter Temperatur durchführen zu können.

In ausführlichen Messreihen konnte gezeigt werden, dass die Detonationszellbreiten bei gegebenem Druck und Temperatur bei bzw. nahe der stöchiometrischen Zusammensetzung am kleinsten sind. Bild 5 zeigt das Detonationszellmuster der Detonation eines stöchiometrischen Ethen/Sauerstoff-Gemisches bei 0,4 bar.

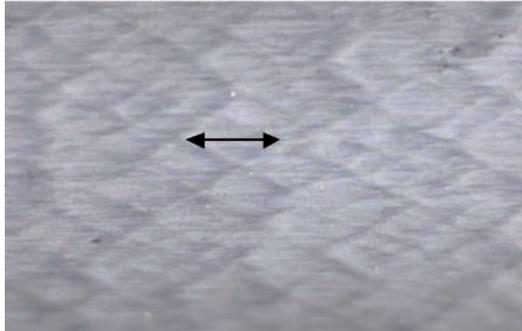


Bild 6:
Struktur des Detonationszellmusters nach der Detonation eines stöchiometrischen Ethen/O₂-Gemisches bei 0,4 bar und Raumtemperatur.

←→ Detonationszellbreite; hier im Mittel 0,83 mm

Bei konstanter Temperatur nimmt die Breite der Detonationszellen mit zunehmendem Druck ab. Bild 6 zeigt dies am Beispiel stöchiometrischer Ethen/Sauerstoff-Gemische. Die Auswertung dieser experimentellen Daten (Ausgleichskurve) ergibt folgende Abhängigkeit der Detonationszellbreite vom Druck bei Raumtemperatur:

$$b_{\text{Ethen}} = 13,98(\pm 1,12) \cdot p_0^{-0,745(\pm 0,03)}$$

wobei:

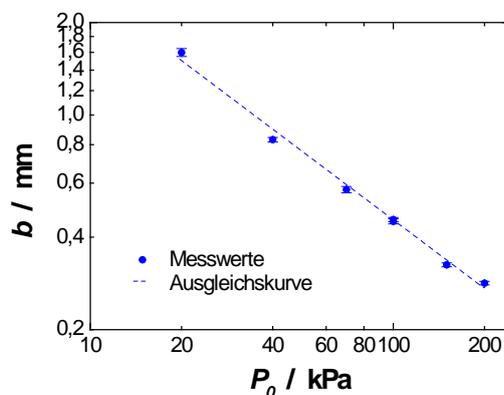
P_0 : Anfangsdruck in kPa

b : mittlere Detonationszellbreite bei P_0 in mm

Daraus ergibt sich eine Detonationszellbreite bei 1 bar von $0,45 \text{ mm} \pm 0,05 \text{ mm}$ und entsprechend der $\lambda/3$ -Regel ein Grenzdurchmesser von maximal $0,13 \text{ mm}$.

Ein Vergleich mit dem mit der Kapillar-Detonationsstrecke ermittelten Grenzdurchmesser von $0,12 \text{ mm}$ (vgl. Bild 4) zeigt, dass die $\lambda/3$ -Regel auch auf Mikroreaktoren in Falle stöchiometrischer Gemische anwendbar ist.

Dies gilt auch für unter- und über-stöchiometrische Gemische, wobei sich allerdings der Detonationsbereich vor allem an der oberen Detonationsgrenze bei Mikrostrukturen deutlich einengt ($p, T = \text{const}$).



Vergleich der Detonationsgrenzen von Ethen/O₂-Gemischen bei 200 kPa in einem Rohr und einer 0,7 mm-Kapillare

	Kapillare 0,7 mm Ø	Rohr 10 mm Ø
untere Detonationsgrenze	$\varphi = 0,25 \cdot c_{\text{stöch}}$	$\varphi = 0,2 \cdot c_{\text{stöch}}$
obere Detonationsgrenze	$\varphi = 1,5 \cdot c_{\text{stöch}}$	$\varphi = 2,75 \cdot c_{\text{stöch}}$

Sofern allerdings (ungewollte) Schwankungen in der Gemischzusammensetzung nicht ausgeschlossen werden können, kann nur die (niedrigste) Detonationszellbreite bei stöchiometrischer Zusammensetzung für die Auslegung der Mikroreaktoren herangezogen werden.

Schlussfolgerung

Sowohl mit der Kapillar-Detonationsstrecke als auch mit Hilfe der Detonationszellmuster lassen sich die Grenzparameter für die Ausbreitung einer Detonation in Mikrostrukturen, zumindest für die Oxidationsmittel Luft, Sauerstoff und Lachgas bestimmen. Um alle Messunsicherheiten und Schwankungsbreiten zu berücksichtigen ist für die Übertragung zur Auslegung eines Mikroreaktors ein Sicherheitszuschlag erforderlich.

Literatur

- [1] Jähmisch, K.; Hessel, V.; et. al: *Angewandte*, **43**, (2004), 406–446
- [2] Gödde, M.; Liebner, C.; Hieronymus, H.: *Chemie Ingenieur Technik*, **81**, (2009), No. 1-2, S. 73–78
- [3] Fischer, J.; Liebner, C.; Hieronymus, H.; Klemm, E.: *Chem. Eng. Sci.*, **64**, (2009), 2951–2956
- [4] Knystautas, R.; Guirao, C. M.; Lee, J. H. and Sulmistras, A.: *Prog. Astronaut. Aeronaut.* **94**, (1984), 23–37
- [5] M. Kaneshige, E. Shepherd: *Detonation Database*, Explosion Dynamics Laboratory Report FM. 97-8, California Institute of Technology, San Francisco, 1999...
- [6] J. E. Shepherd: *Proceedings of the Combustion Institute*, **32**, (2009), 83–98

Bild 7:
Abhängigkeit der mittleren Detonationszellbreite b stöchiometrischer Ethen/Sauerstoff-Gemische vom Ausgangsdruck P_0 bei Raumtemperatur