

Kenngrößen des Explosionsschutzes bei nichtatmosphärischen Bedingungen

Elisabeth Brandes¹, Martin Thedens²

1 Problem

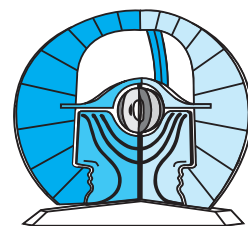
Viele industrielle Prozesse werden bei erhöhter Temperatur und bei Drücken, die sich merklich vom Umgebungsdruck unterscheiden (nicht-atmosphärische Bedingungen), durchgeführt. Wenn bei diesen Verfahren explosionsfähige Gemische nicht ausgeschlossen werden können, muss die Druck- und Temperaturabhängigkeit der sicherheitstechnischen Kenngrößen bekannt sein, um zu entscheiden, ob mit den bei atmosphärischen Bedingungen geltenden Kenngrößen und geprüften explosionsgeschützten Betriebsmitteln eine ausreichende Sicherheit zu gewährleisten ist. Ein systemgerechter Explosionsschutz bei solchen technischen Prozessen erfordert folglich entweder detaillierte Kenntnisse der Druck- und Temperaturabhängigkeit der jeweils notwendigen Kenngrößen des Explosionsschutzes für die betroffenen brennbaren Stoffe oder abgesicherte allgemeingültige Druck- sowie Temperaturkorrelationen für die jeweilige Kenngröße bzw. Zündschutzart der Betriebsmittel. Hinzu kommt, dass in der „Verordnung zur Rechtsvereinfachung im Bereich der Sicherheit und des Gesundheitsschutzes, bei der Bereitstellung von Arbeitsmitteln und deren Benutzung bei der Arbeit, der Sicherheit beim Betrieb überwachungsbedürftiger Anlagen und der Organisation des betrieblichen Arbeitsschutzes“ [1] in Artikel 6 explizit darauf hingewiesen wird, dass auch bei nichtatmosphärischen Bedingungen die jeweiligen relevanten sicherheitstechnischen Kenngrößen heranzuziehen sind. Die Explosionsschutz-Regeln (EX-RL) [2], aber auch DIN EN 50020 [3] definieren atmosphärische Bedingungen mit Temperaturen von -20 °C bis $+60\text{ °C}$ und Drücken von 0,8 bar bis 1,1 bar. Für die wichtigsten Kenngrößen des Explosionsschutzes und die Zündgrenzkurven der Zündschutzart Eigensicherheit ist nachfolgend der aktuelle Stand der Druck- und Temperaturabhängigkeit zusammengefasst.

2 Messverfahren

2.1 Sicherheitstechnische Kenngrößen

Kenngrößen des Explosionsschutzes sind keine Stoffgrößen wie z. B. Dichte oder Siedepunkt. Ihre Zahlenwerte sind in mehr oder weniger starkem Maße abhängig vom Messverfahren. Deshalb sind die meisten Bestimmungsverfahren national und international genormt [z. B. 4 bis 16]. Für Drücke über etwa 2,5 bar liegen ausreichende Untersuchungen nicht vor, so dass keine eindeutigen Aussagen getroffen werden können.

In der Regel sind diese Bestimmungsverfahren für den Einsatz bei erhöhter Temperatur und in vielen Fällen auch für den Einsatz bei reduzierten Drücken geeignet. Für Messungen bei erhöhtem Gemischausgangsdruck können sie im Allgemeinen nicht eingesetzt werden, da die Zündgefäße entweder zur Umgebung offen sind oder ihre Druckfestigkeit nicht entsprechend ausgelegt ist. Hinzu kommt, dass mit Ausnahme der Messverfahren für die Kenngrößen „maximaler Explosionsdruck“ und „maximaler zeitlicher Druckanstieg“ vielfach ein optisches Zündkriterium festgelegt ist. Dies lässt sich bei erhöhten Drücken apparativ oft nur schwer verwirklichen, so dass auf andere Zündkriterien wie z. B. Temperaturanstieg oder Druckanstieg zurückgegriffen werden muss. Die aufgezeigten Temperaturabhängigkeiten sind auf Temperaturen bis ca. 250 °C beschränkt. Für Temperaturen über 250 °C kann sich eine andere Temperaturabhängigkeit ergeben, weil für viele Stoffe bei höheren Temperaturen Vorreaktionen (Cracken etc.) des brennbaren Stoffes nicht ausgeschlossen werden können. Es kann auch durch Erreichen oder Überschreiten der Zündtemperatur zur Zündung kommen. Die aufgezeigten Druckabhängigkeiten gelten, soweit durch den Parameter Druck keine Veränderung des explosionsfähigen Gemisches auftritt und Detonationsphänomene ausgeschlossen sind.



1 Dr. Elisabeth Brandes,
Leiterin des PTB-
Fachlaboratoriums
„Sicherheitstechnische
Kenngrößen“
E-Mail:
elisabeth.
brandes@ptb.de

2 Dr. Martin Thedens,
PTB-Fachlaboratorium
„Druckfeste Kapselung“
E-Mail:
martin.thedens@ptb.de

2.2 Zündgrenzkurven der Zündschutzart Eigensicherheit

Das Schutzprinzip der Zündschutzart Eigensicherheit beruht darauf, dass in einem elektrischen Stromkreis die maximal umsetzbare elektrische Energie begrenzt ist. Die Zündgrenzkurven werden bei normalen Umgebungsbedingungen mit dem Funkenprüfgerät [15] ermittelt. Im Prinzip kann dieses Gerät auch bei Temperaturen bis 250 °C und Drücken bis ca. 5 bar eingesetzt werden.

3 Kenngrößen, die explosionsfähige Gemische beschreiben

Hierzu gehören die untere Explosionsgrenze, die obere Explosionsgrenze, die Sauerstoffgrenzkonzentration, der Flammpunkt, der untere Explosionspunkt, der obere Explosionspunkt sowie der Mindestzünddruck.

Die Kenngröße Flammpunkt existiert entsprechend ihrer Definition nur bei normalen Umgebungsbedingungen.

3.1 Untere Explosionsgrenze, obere Explosionsgrenze, Sauerstoffgrenzkonzentration

Die untere und die obere Explosionsgrenze sowie die Sauerstoffgrenzkonzentration stellen die Grenzkonzentrationen des brennbaren Stoffes bzw. des Sauerstoffes dar, innerhalb derer explosionsfähige Gemische vorliegen.

3.1.1 Temperaturabhängigkeit

Die untere Explosionsgrenze und die Sauerstoffgrenzkonzentration sinken mit steigender Temperatur; die obere Explosionsgrenze erhöht sich. Für den Temperaturbereich bis ca. 250 °C (bei Aromaten auch höher) kann die relative Temperaturabhängigkeit der unteren Explosions-

grenze (siehe Tabelle 1, Bild 1) bis zu – 25 % pro 100 K Gemischtemperatur betragen, die der Sauerstoffgrenzkonzentration bis zu – 17 % pro 100 K. Für die obere Explosionsgrenze liegen zu wenige Messwerte vor, um eine allgemeingültige Aussage treffen zu können. Klar wird jedoch, dass die Temperaturabhängigkeit für jede Grenzkonzentration unterschiedlich ist.

3.1.2 Druckabhängigkeit

Die untere Explosionsgrenze und die Sauerstoffgrenzkonzentration sind über den Bereich von etwa 0,05 bar bis etwa 2,5 bar in der Regel unabhängig vom Druck [17]. Für Drücke über etwa 2,5 bar liegen ausreichende Untersuchungen nicht vor, sodass keine eindeutigen Aussagen getroffen werden können. Die obere Explosionsgrenze steigt im Gegensatz zur unteren deutlich mit steigendem Druck. Die aktuelle Datenlage erlaubt keine Verallgemeinerung bez. des Ausmaßes der Druckabhängigkeit. Für Drücke unterhalb ca. 0,05 bar ergibt sich ein deutlicher Anstieg sowohl der unteren Explosionsgrenze als auch der Sauerstoffgrenzkonzentration bzw. ein Abfall der oberen Explosionsgrenze bis zum Mindestzünddruck, bei dem die untere und die obere Explosionsgrenze zusammenfallen. Der Mindestzünddruck sinkt mit steigender Temperatur.

3.1.3 Explosionspunkt

Der untere Explosionspunkt bzw. obere Explosionspunkt einer brennbaren Flüssigkeit ist die auf 1,013 bar bezogene Temperatur, bei der die Konzentration des gesättigten Dampf/Luft-Gemisches gleich der unteren Explosionsgrenze bzw. oberen Explosionsgrenze ist. Da der Partialdruck über weite Druckbereiche unabhängig ist vom Gesamtdruck, sinkt der untere Explosionspunkt mit sinkendem Druck und steigt mit steigendem Druck.

Substanz	d(UEG)/dT	d(OEG)/dT	d(SGK)/dT
	% pro 100 K	% pro 100 K	(Inertgas: N ₂) % pro 100 K
Cyclohexan	– 9	+ 12	– 10
Methanol	– 11	+ 11	– 9
Methan	– 15	+ 12	– 16
Xylol	– 20	+ 6	– 8
Cyclohexanon	– 21	+ 6	
Methanol + Mesitylen (3 + 7 Stoffmengenanteile)	– 25		

Tabelle 1:

Beispiele für die Temperaturabhängigkeit der unteren Explosionsgrenze (UEG), der oberen Explosionsgrenze (OEG) und der Sauerstoffgrenzkonzentration (SGK)

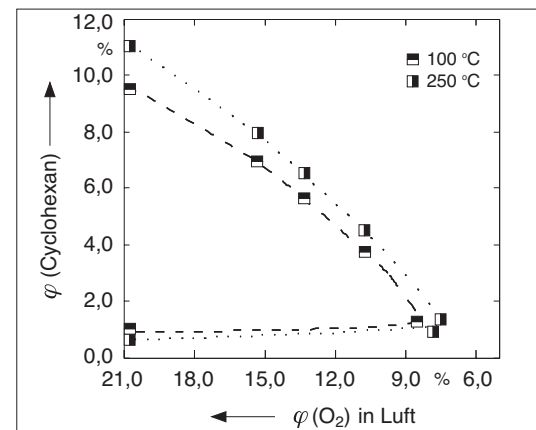


Bild 1:

Temperaturabhängigkeit des Explosionsbereiches von Cyclohexan φ : Stoffmengenanteil

Druck in bar	UEG in % Vol.anteil	OEG in % Vol.anteil	SGK in % Vol.anteil
0,025	3,6	5,5	12,5
0,1	1,8	10,2	8,3
0,6	1,4	11,1	7,4
1,0	1,3	12,3	7,5
20,0	1,3	ca. 45	7,0

Tabelle 2: Druckabhängigkeit der unteren Explosionsgrenze (UEG), der oberen Explosionsgrenze (OEG) und der Sauerstoffgrenzkonzentration (SGK) am Beispiel von Isopropanol bei 200 °C

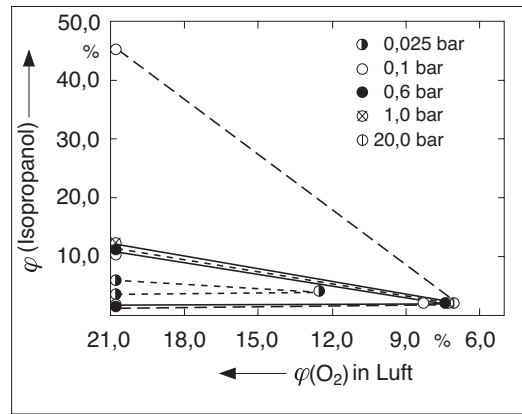


Bild 2: Druckabhängigkeit des Explosionsbereiches von Isopropanol bei 200 °C; phi: Stoffmengenanteil

Druck in bar	UEP in °C
0,025	-28
0,1	-14
0,6	4
1,0	11
20,0	65

Tabelle 3: Druckabhängigkeit des unteren Explosionspunktes (UEP) am Beispiel von Isopropanol

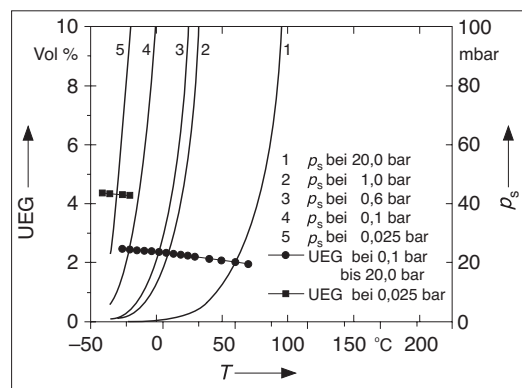


Bild 3: Druckabhängigkeit des unteren Explosionspunktes (UEP) am Beispiel von Isopropanol, p_s: Partialdruck

4 Kenngrößen, die Zündquellen charakterisieren

Für die Praxis von großem Interesse sind in der Regel die Zündquellen: heiße Oberflächen, Flammen, elektrische Funken, Entladung statischer Elektrizität und mechanisch erzeugte Funken. Diesen Zündquellen sind folgende Kenngrößen zugeordnet:

Zündquelle	↔	Kenngröße
heiße Oberfläche		Zündtemperatur
Flammendurchschlag		flammendurchschlagssichere Spaltweite
elektrische Funken		Mindestzündstrom, Mindestzündspannung, Mindestzündenergie
statische Elektrizität		Mindestzündenergie

Können prozessbedingt explosionsfähige Gemische auftreten, lassen sich Explosionen unter anderem dadurch verhindern, dass explosionsgeschützte Betriebsmittel eingesetzt werden. Dabei ist die Zündschutzart „Eigensicherheit“ für elektrische Betriebsmittel sehr weit verbreitet. Das Schutzprinzip „Eigensicherheit“ beruht darauf, dass in einem elektrischen Stromkreis durch Begrenzen von Strom und Spannung die maximal mögliche elektrische Energie so begrenzt wird, dass auftretende Funken und damit verbundene thermische Effekte nicht zur Zündquelle werden. Durch diese Begrenzung der Energie ist sowohl im normalen Betrieb als auch im Fehlerfall sichergestellt, dass die auftretenden Energien keine Explosion verursachen können. Neben der Begrenzung von Strom und Spannung, also der Leistung, müssen auch Höchstwerte für Induktivitäten und Kapazitäten festgelegt werden, da die in diesen Bauteilen gespeicherte Energie u. U. zur Zündung zusätzlich zur Verfügung stehen kann. Grundlage für die Begrenzung von Strom und Spannung sind die für unterschiedliche Prüfgemische ermittelten „Zündgrenzkurven“.

4.1 Zündtemperatur

Die Zündtemperatur ist die niedrigste Temperatur (einer heißen Oberfläche), bei der die Entzündung eines brennbaren Gases oder Dampfes im Gemisch mit Luft auftritt.

4.1.1 Druckabhängigkeit

Liegt die Zündtemperatur bei Umgebungsbedingungen über 180 °C sinkt sie mit steigendem Druck bis auf ein Niveau von ca. 180 °C bis 200 °C bzw. bleibt auf diesem Niveau (nach heutigem Wissensstand) [18, 19, 20]. Das Ausmaß der Druckabhängigkeit ist jedoch stoffabhängig. Bild 4 zeigt einige Beispiele. Für Stoffe mit Zündtemperaturen unter 180 °C liegen keine ausreichenden Messreihen vor, um Aussagen zu treffen.

4.2 Flammendurchschlagsichere Spaltweite

Die flammendurchschlagsichere Spaltweite ist der Abstand eines Ringspaltes (definierte Länge: 25 mm), bestimmt nach genormtem Verfahren, der bei jeder Konzentration des explosionsfähigen Brennstoff/Luft-Gemisches den Durchtritt einer Flamme gerade noch verhindert.

4.2.1 Temperaturabhängigkeit

Die flammendurchschlagsichere Spaltweite sinkt mit steigender Temperatur. Für den Temperaturbereich bis ca. 250 °C kann die flammendurchschlagsichere Spaltweite um bis zu 15 % pro 100 K Temperaturanstieg sinken.

4.2.2 Druckabhängigkeit

Für den Druckbereich von etwa 0,3 bar bis etwa 2,5 bar sinkt die flammendurchschlagsichere Spaltweite umgekehrt proportional zum Gemischsausgangsdruck.

Für Drücke über etwa 2,5 bar liegen ausreichende Untersuchungen nicht vor, sodass keine eindeutigen Aussagen getroffen werden können.

Für Drücke unterhalb 0,3 bar ist die Apparatur ungeeignet, da dann der Durchmesser des Innenvolumens die Größenordnung des Löschabstandes erreicht [17].

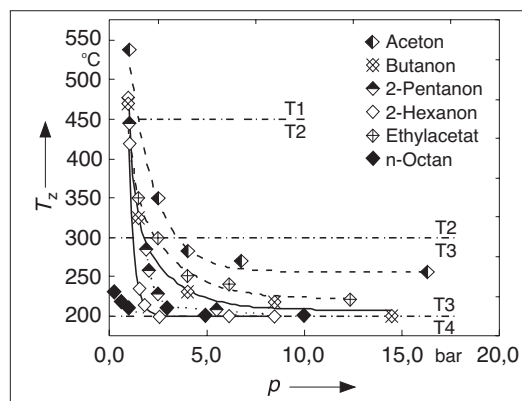


Bild 4:

Druckabhängigkeit der Zündtemperatur T_z
p: Gemischsausgangsdruck

4.3 Mindestzündenergie

Die Mindestzündenergie ist der Mindestwert der im Entladekreis gespeicherten Energie, die bei Entladung über eine Funkenstrecke unter optimierten Bedingungen das Brennstoff/Luft-Gemisch, bei jeder Zusammensetzung des Brennstoff/Luft-Gemisches gerade noch entzündet.

4.3.1 Druck- und Temperaturabhängigkeit

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

4.4 Mindestzündstrom

Der Mindestzündstrom ist der Mindestwert des Stromes eines ohmschen oder induktiven Stromkreises, ermittelt nach vorgeschriebenem Verfahren, durch den explosionsfähige Gemische des brennbaren Stoffes und Luft bei jeder Zusammensetzung gerade noch entzündet werden können.

4.4.1 Druck- und Temperaturabhängigkeit

Der Mindestzündstrom sinkt mit steigender Temperatur und steigendem Druck. Da nur wenige Messreihen bei nichtatmosphärischen Bedingungen vorliegen, sind verallgemeinerbare Aussagen zzt. nicht möglich.

4.5 Zündgrenzkurven

Die Zündgrenzkurven, die für die Zündschutzart „Eigensicherheit“ herangezogen werden, stellen für das jeweilige Prüfgemisch und den jeweiligen Stromkreis (ohmsch, induktiv, kapazitiv) die Strom-Spannungskorrelationen mit einer Zündwahrscheinlichkeit von $1 \cdot 10^{-3}$ dar. Die Zündgrenzkurven werden mit dem Funkenprüfgerät [15] ermittelt.

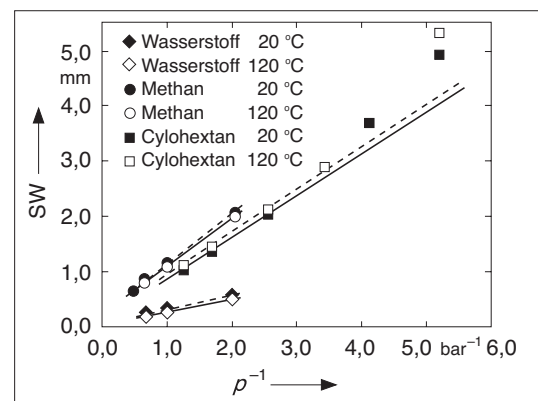


Bild 5:

Druck- und Temperaturabhängigkeit der flammendurchschlagsicheren Spaltweite SW

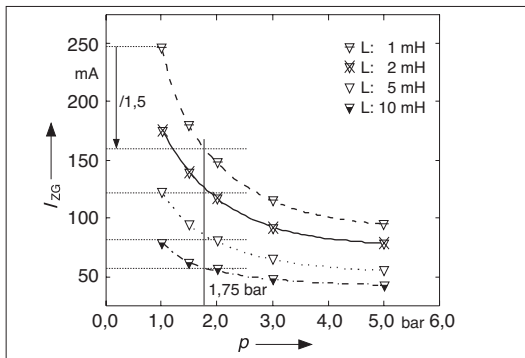


Bild 6:
Druckabhängigkeit des Zündgrenzstromes I_{ZG} im ohmsch-induktiven Stromkreis für das Prüfgemisch 21 Volumenanteile Wasserstoff in Luft, p : Gemischausgangsdruck

4.5.1 Druck- und Temperaturabhängigkeit

Mit steigendem Druck verschieben sich die Zündgrenzkurven bei gleichbleibender Zündwahrscheinlichkeit zu niedrigeren Werten des Zündgrenzstromes bzw. der Zündgrenzspannung [21]. Bild 6 zeigt dies am Beispiel des ohmsch-induktiven Stromkreises für das Prüfgemisch der Betriebsmittelgruppe IIC (21 Volumenanteile Wasserstoff in Luft).

5 Kenngrößen, die die Explosionswirkung quantifizieren

Hierzu zählen der maximale Explosionsdruck, der maximale zeitliche Druckanstieg und die Verbrennungsgeschwindigkeit.

5.1 Maximaler Explosionsdruck

Der maximale Explosionsdruck ist der unter vorgeschriebenen Versuchsbedingungen ermittelte höchste Druck, der in einem geschlossenen Behälter bei der Explosion einer explosionsfähigen Atmosphäre auftritt.

5.1.1 Temperaturabhängigkeit

Für den Temperaturbereich bis ca. 250 °C sinkt der maximale Explosionsdruck mit steigender Temperatur [17].

5.1.2 Druckabhängigkeit

Für den Druckbereich zwischen etwa 0,05 bar und etwa 5 bar steigt der maximale Explosionsdruck proportional zum Gemischausgangsdruck [17]. Für Drücke über 5 bar liegen ausreichende Untersuchungen nicht vor.

6 Folgerungen für den Explosionsschutz

6.1 Explosionsschutzmaßnahme „Vermeiden explosionsfähiger Gemische“

Explosionsfähige Gemische können vermieden werden durch Unterschreiten der unteren Explosionsgrenze, durch Unterschreiten der Sauerstoffgrenzkonzentration oder durch Überschreiten der oberen Explosionsgrenze. In der Regel erfolgt dies durch Festlegen und Überwachen eines Sicherheitsabstandes zum jeweiligen Grenzwert. Mit einem gleichen oder vergleichbaren prozentualen Abstand ist auch eine entsprechende Sicherheit bei nichtatmosphärischen Bedingungen gegeben. Das Einhalten des bei Umgebungsbedingungen festgelegten Absolutwertes bietet jedoch keine entsprechende Sicherheit bei erhöhten Temperaturen sowie erhöhten Drücken. Der für Umgebungsbedingungen abgeleitete Absolutwert bietet jedoch Sicherheit bei niedrigeren Temperaturen und erniedrigten Drücken. Da in der Regel die Temperaturabhängigkeiten der unteren Explosionsgrenze und der Sauerstoffgrenzkonzentration ausgeprägter sind als die jeweiligen Druckabhängigkeiten, kann der Anstieg der unteren Explosionsgrenze bzw. Sauerstoffgrenzkonzentration, der sich beim Absenken des Druckes ergibt, durch ein Erhöhen der Gemischtemperatur aufgehoben werden (Bild 7).

Wird die Explosionsschutzmaßnahme „Vermeiden explosionsfähiger Gemische“ realisiert, indem der untere Explosionspunkt unterschritten wird, kann der bei Umgebungsdruck ermittelte untere Explosionspunkt nur für erhöhte Drücke eine ausreichende Sicherheit bieten, nicht jedoch für Drücke unterhalb Umgebungsdruck. Dies bedeutet auch, dass es bei deutlich reduzierten Drücken auch bei einem Lösemittel, dessen Flammpunkt (bei Umgebungsbedingungen) in sicherem Abstand (siehe 3.2) oberhalb der Verarbeitungstemperatur liegt, zur Bildung explosionsfähiger Dampf/Luft-Gemische kommen kann [17].

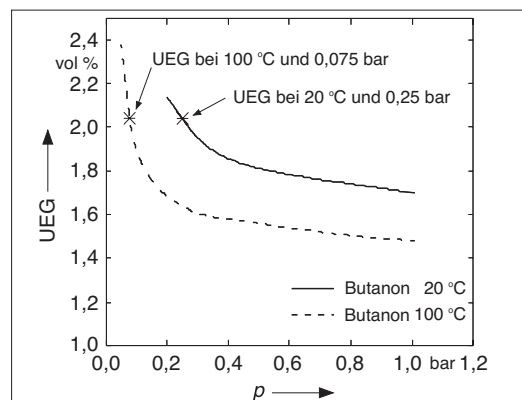


Bild 7:
UEG von Butanon bei unterschiedlichen Drücken und Temperaturen. p : Gemischausgangsdruck

6.2 Explosionsschutzmaßnahme „Vermeiden von Zündquellen“

Sofern es nicht möglich ist, explosionsfähige Gemische zu vermeiden, muss verhindert werden, dass Zündquellen wirksam werden. Mit Bezug auf die wichtigen Zündquellen „Elektrischer Funke“ und „Flammendurchschlag“ werden die Stoffe, aber auch die explosionsgeschützten Betriebsmittel aufgrund der flammendurchschlagsicheren Spaltweite in Explosionsgruppen eingeteilt [22]. Da die flammendurchschlagsichere Spaltweite einerseits umgekehrt proportional zum Gemischausgangsdruck ist, und andererseits linear mit der Gemischausgangstemperatur sinkt, bleibt die Relation der Einstufung bez. der Explosionsgruppen bei nichtatmosphärischen Bedingungen erhalten. Wird aufgrund einer flammendurchschlagsicheren Spaltweite eines Brennstoff/Luft-Gemisches bei nichtatmosphärischen Bedingungen ein explosionsgeschütztes Betriebsmittel ausgewählt, so muss dieses Betriebsmittel auch unter diesen nichtatmosphärischen Bedingungen geprüft werden. Unter sicherheitstechnischen Gesichtspunkten können die bei Umgebungsbedingungen geltenden stofflichen Einstufungen jedoch nur für niedrigere Temperaturen und niedrigere Drücke als sicher gelten.

Ähnliches gilt für die Zündgrenzkurven der Zündschutzart „Eigensicherheit“. Unter sicherheitstechnischen Gesichtspunkten können die bei Umgebungsbedingungen geltenden Einstufungen jedoch nur für niedrigere Drücke als sicher gelten. Für erhöhte Ausgangsdrücke muss deshalb die Energie im elektrischen Funken verringert werden, will man eine gleichbleibende Zündwahrscheinlichkeit erzielen. Dies lässt sich durch die Verringerung der (Zünd-)Spannung bzw. des (Zünd-)Stromes oder durch die Reduzierung von Induktivitäten und Kapazitäten (innere und äußere Bauteile sowie Kabel und Leitungen) erreichen. Es ist jedoch nicht zulässig, mit Hilfe des in der Eigensicherheit üblicherweise verwendeten Sicherheitsfaktors den Einfluss des Gemischausgangsdruckes auszugleichen. Der Sicherheitsfaktor soll Prüfungs-, Bauteile- und Herstellungstoleranzen sowie Schwankungen von Druck und Temperatur innerhalb der atmosphärischen Bedingungen berücksichtigen. Wie Bild 6 zeigt, würde schon ein erhöhter Gemischausgangsdruck von 1,75 bar (absolut) diesen Sicherheitsfaktor vollständig „verbrauchen“.

Für die Zündquelle „Heiße Oberfläche“ ist zzt. für Drücke über Umgebungsdruck eine individuelle, stoffbezogene Aussage möglich. Wie aus Bild 4 deutlich zu erkennen ist, bleibt weder die Gruppierung der Stoffe bei der Einstufung in die Temperaturklassen, noch die Relation der

Einstufung erhalten. Gleiches ist für Drücke unterhalb Umgebungsdruck zu erwarten. Für diese Druckbereiche können die für Umgebungsbedingungen geltenden Einstufungen und Grenzwerte jedoch verwendet werden, da die Zündtemperatur zu niedrigeren Drücken hin ansteigt.

6.3 Konstruktiver Explosionsschutz

Für erhöhte Temperaturen und reduzierte Drücke bietet das Zugrundelegen der Werte bei Umgebungsbedingungen eine ausreichende Sicherheit. Für Drücke oberhalb Umgebungsdruck (und auch für deutlich erniedrigte Temperaturen) müssen die bei diesen Bedingungen bestimmten Explosionsdrücke herangezogen werden.

Literatur

- [1] Verordnung zum Schutz vor gefährlichen Stoffen (Gefahrstoffverordnung – GefStoffV) vom 26. Oktober 1993 BGBl. I 1993 S. 1782, einschließlich aller Änderungen. Zuletzt geändert am 15. Oktober 2002 BGBl. I S. 4123
- [2] Explosionsschutz Regeln – (EX-RL), Regeln für das Vermeiden der Gefahren durch explosionsfähige Atmosphäre, Werbedruck Winter, 2002
- [3] DIN EN 50020: Elektrische Betriebsmittel für explosionsgefährdete Bereiche – Eigensicherheit „i“; Deutsche Fassung EN 50020, Beuth-Verlag, 1996
- [4] DIN EN 22719: Bestimmung des Flammpunktes – Verfahren nach Pensky-Martens mit geschlossenem Tiegel, Beuth-Verlag, 1992
- [5] DIN 51755: Prüfung von Mineralölen und anderen brennbaren Flüssigkeiten; Bestimmung des Flammpunktes im geschlossenen Tiegel nach Abel-Pensky, Beuth-Verlag, 1974
- [6] DIN 51755-2: Prüfung von Mineralölen und anderen brennbaren Flüssigkeiten; Bestimmung des Flammpunktes im geschlossenen Tiegel nach Abel-Pensky, Verfahren zur Bestimmung des Flammpunktes unterhalb + 5 °C bis etwa – 30 °C, Beuth-Verlag, 1978
- [7] DIN EN ISO 13736: Mineralölprodukte und Flüssigkeiten – Bestimmung des Flammpunktes – Verfahren mit geschlossenem Tiegel nach Abel (ISO 13736); Deutsche Fassung EN ISO 13736, Beuth Verlag, 2000
- [8] ISO 3679: Lacke, Anstrichstoffe, Mineralöl und ähnliche Erzeugnisse; Bestimmung des Flammpunktes; Schnellverfahren, ISO, 1983

- [9] DIN 51649-1: Bestimmung der Explosionsgrenzen von Gasen und Gasgemischen in Luft, Beuth-Verlag, 1986
- [10] DIN EN 1839 (Normentwurf): Bestimmung der Explosionsgrenzen von Gasen und Dämpfen; Deutsche Fassung prEN 1839, Beuth Verlag, 2002
- [11] DIN 51794: Prüfung von Mineralölkohlenwasserstoffen; Bestimmung der Zündtemperatur, Beuth-Verlag, 1978
- [12] DIN EN 14522 (Normentwurf): Bestimmung der Mindestzündtemperatur von Gasen und Dämpfen; Deutsche Fassung prEN 14522, Beuth Verlag, 2002
- [13] IEC 60079-4: Electrical apparatus for explosive gas atmospheres. Part 4: Method of test for ignition temperature, IEC 1975
- [14] IEC 60079-1-1: Electrical apparatus for explosive gas atmospheres – Part 1-1: Flameproof enclosures „d“ – Method of test for ascertainment of maximum experimental safe gap, IEC, 2002
- [15] IEC 60079-11: Electrical apparatus for explosive gas atmospheres – Part 11: Intrinsic safety „i“, IEC, 1999
- [16] DIN EN 13673-1 (Normentwurf): Verfahren zur Bestimmung des maximalen Explosionsdruckes und des maximalen zeitlichen Druckanstieges für Gase und Dämpfe – Teil 1: Bestimmungsverfahren für den maximalen Explosionsdruck; Deutsche Fassung prEN 13673-1, Beuth Verlag, 2002
- [17] Brandes, E.; Pawel, D.: Explosionsschutz bei Drücken unterhalb des atmosphärischen Druckes. In „Reinigen mit Kohlenwasserstoff-Lösemitteln und Wasser“, Hrsg. K. Haertlein, expert-Verlag, 2000
- [18] Steen, H. (Hrsg.): „Handbuch des Explosionsschutzes“, Wiley-VCH, 2000
- [19] Gödde, M.: „Zündtemperaturen organischer Verbindungen in Abhängigkeit von chemischer Struktur und Druck“, Diss. TU Braunschweig, PTB-Bericht ThEx-8, 1998
- [20] Möller, W. O.: „Autoignition Temperatures At Non-atmospheric Pressures“, Int. ESMG Symp. Process Safety and Industrial Explosion Protection, Nürnberg, 2002
- [21] Thedens, M.: „Funkenzündung von Gasgemischen bei erhöhten Drücken und Temperaturen für die Zündschutzart Eigensicherheit“, Diss. TU Braunschweig, PTB-Bericht ThEx-23, 2000
- [22] DIN EN 50014: Elektrische Betriebsmittel für explosionsgefährdete Bereiche – Allgemeine Bestimmungen; Deutsche Fassung EN 50014: 1997
+ Corrigendum: 1998
+ A1: 1999 + A2: 1999