

1

Grundwissen zu Brand und Explosion, Gefahrenereinschätzung

Falls statische Elektrizität – wie man ihrem Namen nach annehmen könnte – wirklich statisch wäre, könnte man sie weitgehend ignorieren. Doch wenn sie sich mehr von ihrer dynamischen Seite zeigt, wird sie uns bewusst. Wir nehmen sie wahr als harmlose elektrische Schläge, z. B. beim Aussteigen aus einem Auto, aber auch als tödliche Blitzschläge bei Gewittern (siehe Kapitel 4, Gasentladungen).

Die Absicht dieses Buches ist, darzulegen, dass offensichtlich schwache Entladungserscheinungen durchaus in der Lage sind, brennbare Materialien zu entzünden und somit Schadenfeuer und sogar Personenschaden herbeizuführen. Das führt in manchen Fällen – in denen es an einer plausiblen Erklärung für eine Störung oder auch ein Unfallgeschehen mangelt – sogar dazu, dass die Elektrostatik für Schadensereignisse verantwortlich gemacht wird, die nicht von ihr verursacht wurden.

Die gefährbringenden Erscheinungen der statischen Elektrizität erstrecken sich über einen weiten Energiebereich:

- In Gewitterblitzen werden Energiebeträge im Bereich von Megajoule freigesetzt.
- Gleitstielbüschelentladungen können einige Joule hervorbringen.
- Büschelentladungen bringen Energien im Bereich von Mikro- bis Millijoule auf.

Dieses Buch soll dazu beitragen, elektrostatische Aufladung besser einzuschätzen, um so zu einer richtigen Beurteilung der von ihr ausgehenden Gefahren zu gelangen. Dazu gehören zunächst Grundkenntnisse über die bei Verbrennungsvorgängen (Bränden und Explosionen) bestehenden Zusammenhänge.

1.1 Grundlegendes zu Brand- und Explosionsvorgängen

Worin unterscheiden sich Brand und Explosion voneinander [☐ T1]?

Gemeinsam ist beiden das Erscheinungsbild der Flamme, die stets eine schnelle Verbrennung in der Gasphase (Brennstoff-Luft-Gemisch) anzeigt. Die dabei ablaufende chemische Reaktion führt entsprechend der Verbrennungswärme zu einem Anstieg der Temperatur.

Bei einem Brand ist die Flamme „quasi stationär“, z. B. bei einer brennenden Kerze. Dabei überträgt sich die Reaktionswärme ohne Druckanstieg in die Umgebung.

Falls jedoch in einem Raumvolumen eine brennbare Atmosphäre vorliegt (z. B. im Zylinder eines Verbrennungsmotors), kommt es zu einer Explosion, wobei sich eine von der Zündquelle ausgehende Flammenfront durch das gesamte Volumen bewegt. Bei einem stöchiometrischen (siehe Abb. 1.7) Brenngas-Luft-Gemisch breitet sich unter atmosphärischen Bedingungen die Flammenfront mit einer Geschwindigkeit von etwa 10 m/s aus. Befindet sich die brennbare Atmosphäre in einem abgeschlossenen Volumen, so führt die Ausdehnung des durch die Reaktionswärme erhitzten Gases (exotherme Reaktion) zu einem kurzzeitigen Druckanstieg auf etwa 10 bar, der nach Abkühlung wieder zurückgeht und sogar einen Unterdruck herbeiführt.

Entscheidend ist, dass dieser kurzzeitige Druckanstieg ein zerstörendes Ausmaß annehmen kann, wenn er unkontrolliert stattfindet (z. B. bei einer Gasexplosion in einem Wohnhaus). Die Flammenerscheinung beweist eine exotherme Reaktion (Oxidation der Brennstoffmoleküle) in der Gasphase. Daraus folgt, dass fester oder flüssiger Brennstoff im Allgemeinen erst in die Gasphase überführt werden muss, damit es zu einer Reaktion kommen kann. Bei entzündbaren Flüssigkeiten liegt eine solche molekulare Brennstoff-Sauerstoff-Mischung bereits durch Verdampfung vor. Bei festen oder staubförmigen organischen Brennstoffen wird ein wesentlicher Teil der Zündenergie dafür benötigt, durch Verdampfen, Schmelzen oder Aufspalten (Cracken) gasförmige Kohlenwasserstoffe zu bilden, deren Menge so groß sein muss, dass nach der Zündung des Gemisches in Luft die freigesetzte Wärmeenergie in der Lage ist, die weitere thermische Aufbereitung des Feststoffs zu sichern. Entsprechendes gilt für die Nebel entzündbarer Flüssigkeiten mit hohem Flammpunkt (siehe Abschn. 1.2.2). Bei anorganischen Stäuben einschließlich Metallstäuben muss zur Initiierung der Verbrennung eine meist nicht unerhebliche Aktivierungsenergie für die Verbrennungsreaktion durch die Zündquelle aufgebracht werden. So erklärt sich, weshalb brennbare Gase und Dämpfe eine wesentlich geringere Zündenergie benötigen als flüssige oder feste Brennstoffe.

Wie oft in der Realität gibt es auch hier eine Ausnahme zu beachten: Metallstäube können unmittelbar mit dem Luftsauerstoff heftig reagieren: Es kommt zur Oxidation (Verbrennung) an der Oberfläche z. B. bei Leichtmetallstäuben, wie Aluminium oder auch bei Stahlwolle usw.

Die in einer Flamme freigesetzte Wärme führt sowohl wegen der neu entstehenden Abgase als auch wegen der entstehenden Aufheizung zu einer Volumenvergrößerung (aus einem Volumen Propan und fünf Volumen Sauerstoff werden z. B. drei Volumen Kohlendioxid und vier Volumen Wasserdampf). Hierbei kann eine Verpuffung, eine Explosion oder sogar eine Detonation entstehen. Bei einer Verpuffung führt die Verbrennungsreaktion lediglich zu einer Volumenerweiterung, nicht aber zu einem relevanten Druckaufbau. Die Verbrennungsgeschwindigkeit (Geschwindigkeit der Flammenfront) beträgt weniger als 1 m/s. Entsprechend gering sind auch Druckanstieg und Geräusch.

Beispielhaft sind Verpuffungen in Feuerungsanlagen, in denen nach einer fehlerhaften Zündung eine explosionsfähige Atmosphäre aus nicht gezündetem

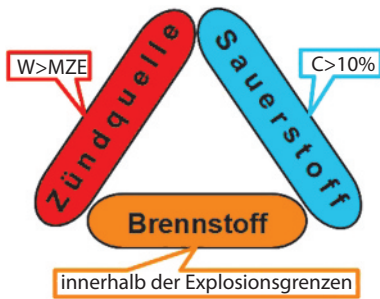


Abb. 1.1 Gefahrendreieck.

Brennstoff auftreten kann. Wird diese Atmosphäre bei wiederholtem Starten des Brenners durchgezündet, entsteht eine Druckwelle, die zum Kamin hin entspannt wird.

Ereignet sich der Verbrennungsvorgang unter atmosphärischen Bedingungen in einem abgeschlossenen Volumen, so entwickelt sich daraus eine Explosion. In rohrförmigen Gebilden kann eine Explosion zu einer Verdichtung des Gasgemisches in der fortschreitenden Reaktionszone führen mit der Folge, dass die Verbrennungsgeschwindigkeit immer höher wird und in den Bereich der Überschallgeschwindigkeit (einige km/s) gelangen kann. Die Explosion geht in eine Detonation über. Hierbei können Druckanstiege bis zum Hundertfachen des Ausgangsdruckes erreicht werden. Verheerende Zerstörungen können die Folge sein.

Im Prinzip kommt es zu einem Brand oder einer Explosion, wenn die folgenden Komponenten

- Brennstoff
- Sauerstoff
- Zündquelle

zeitlich und räumlich zusammentreffen, wie es das Gefahrendreieck (Abb. 1.1) anschaulich darstellt. Es wird weltweit verwendet, insbesondere um aufzuzeigen, dass stets diese drei Komponenten erforderlich sind, ein Feuer herbeizuführen, und, falls nur eine davon ausfällt, es nicht zu einer Verbrennung kommt. Ausnahme bilden Zerfallsreaktionen z. B. von Acetylen, oder die Reaktion von Chlor mit Wasserstoff.

Doch darüber hinaus müssen die genannten Komponenten zusätzliche Anforderungen erfüllen:

- Brennstoff

Der Brennstoff steht in diesem Zusammenhang für das Material, das eine explosionsfähige Atmosphäre bildet. Es ist zwar erforderlich, zwischen gasförmigen, flüssigen und festen Brennstoffen zu unterscheiden, doch eine Gemeinsamkeit besteht darin, dass es nur innerhalb eines bestimmten Konzentrationsbereiches von Brennstoff in Luft (siehe Abschn. M.5.1.1) zu Verbrennungen kommen kann. Für brennbare Flüssigkeiten ist die untere Explosionsgrenze durch den „Flammpunkt“ in guter Näherung charakterisiert (siehe Abb. 1.2). Zwischen dieser unteren und der oberen Explosionsgrenze herrscht stets eine explosionsfähige Atmosphäre.

- **Zündquelle**
Die Zündquelle steht in diesem Zusammenhang für die thermische oder elektrische Energie, die nötig ist, eine Zündung des Brennstoffs herbeizuführen.
- **Sauerstoff**
Die minimale für eine Verbrennung notwendige Sauerstoffkonzentration in der Atmosphäre ist vom Brennstoff abhängig. Im Allgemeinen gilt, dass es bei einer Sauerstoffkonzentration unter etwa 10 % nicht mehr zu Verbrennungsvorgängen kommt.
- **Zündquelle ↔ Sauerstoff**
Es wird darauf hingewiesen, dass ein Zusammenhang zwischen Sauerstoffkonzentration und Zündenergie besteht: Je höher die Sauerstoffkonzentration umso geringer ist der Bedarf an Zündenergie und umgekehrt.

Voraussetzung für den raschen Ablauf der Verbrennungsreaktion ist stets eine fein verteilte Form des Brennstoffs im Gemisch mit Luft. Das erfolgt bei flüssigen Brennstoffen weitgehend selbstständig durch Verdampfen. Dabei ist zu beachten, dass alle Dämpfe entzündbarer Flüssigkeiten eine höhere Dichte aufweisen als Luft. Deshalb ist die Dampfkonzentration am Boden eines Behälters stets höher als im oberen Bereich. Ist aber einmal ein homogenes Dampf-Luft-Gemisch, z. B. durch Umdrehen eines Gefäßes, herbeigeführt worden, so verhindert die Brown'sche Molekularbewegung ein erneutes Absinken der Dampfphase, das Gemisch bleibt homogen (siehe Abschn. 6.8).

Feste Brennstoffe (z. B. Kaminholz) lassen sich in kompaktem Zustand nur schwer entzünden, sie gelten aber als feuergefährlich. Zur Entzündung müssen sie zuvor zerkleinert (pulverisiert) werden, um so eine hinreichend große Oberfläche aufzuweisen, die sich dem Luftsauerstoff zur Reaktion darbietet. Zu welcher enormen Oberflächenzunahme die Zerkleinerung eines Feststoffes führt, zeigt die Übersicht in Tab. 1.1.

Analog zu kompakten, festen Brennstoffen kann Staub im abgelagerten Zustand zwar abbrennen, ist aber nicht explosionsfähig. Zur Explosionsgefahr kommt es erst durch Aufwirbeln des Staubes, z. B. infolge einer Gleitstielbüschelentladung (siehe Abschn. 6.9.7.1).

Wie bereits dargelegt, benötigen Nebel und Stäube zu ihrer Entzündung Energiebeträge, die um Größenordnungen höher liegen, als die für Gase und Dämpfe.

Die zur Entzündung eines zündwilligsten Gemisches aus Brennstoff (Gas oder Staub) und Luft unter atmosphärischen Bedingungen erforderliche Energie (siehe Abschn. M.5.1.1) wird als Mindestzündenergie (MZE) definiert (siehe

Tab. 1.1 Oberflächenzunahme bei Zerkleinerung.

Anzahl Würfel	Kantenlänge	Oberfläche
1	10 mm	0,0006 m ²
10 ³	1 mm	0,006 m ²
10 ⁶	100 µm	0,06 m ²
10 ⁹	10 µm	0,6 m ²
10 ¹²	1 µm	6 m ²

Tab. 1.2 Einteilung brennbarer Gase und Dämpfe in Temperaturklassen, Explosionsgruppen und Grenzspaltweiten.

Temperatur- klasse		T1	T2	T3	T4	T6
Zündtemperatur [°C]		> 450	> 300	> 200	> 135	> 85
Explosions- gruppe	Grenzspalt- weite MESG					
I (Bergbau)		Methan				
II A MZE $\geq 0,2$ mJ	> 0,9 mm	Ammoniak Aceton Propan Benzol	Cyclohexan <i>n</i> -Butan <i>n</i> -Hexan	Benzine Dieselkraft- stoff Kerosine Heizöle	Acetaldehyd	–
II B MZE < 0,2 mJ MZE > 0,02 mJ	0,5 mm \leq MESG \leq 0,9 mm	Stadtgas Acrylnitril	Ethanol ^{a)} Ethylen Ethylenoxid	Ethylenglykol Schwefel- wasserstoff	Ethylether	–
II C MZE $\leq 0,02$ mJ	< 0,5 mm	Wasserstoff	Acetylen	–	–	Schwefel- kohlenstoff

a) Ethanol wird jedoch aus pragmatischen Gründen wie Flüssigkeiten der Explosionsgruppe IIA behandelt (siehe auch IEC/TS 60079-32-1, Abschnitt C 6, Minimum Ignition Energies [1]).

Abschn. 1.2.3). Sie ist für Gase rein stoffspezifisch, bei Stäuben hingegen maßgeblich von deren Teilchengröße abhängig.

Die Mindestzündenergiewerte für Gase sind bereits weitgehend bekannt und dementsprechend in Explosionsgruppen eingeteilt. Diese Ordnung hat sich inzwischen international etabliert (Tab. 1.2, CENELEC – IEC – NEC 505). Ein weiteres Merkmal für die Entzündung von Gasen ist die zu ihrer Zündung erforderliche Temperatur, eingeteilt in die Temperaturklassen T1 bis T6 (siehe Tab. 1.2). Sie sind für eine Beurteilung elektrostatischer Zündgefahren ohne Bedeutung, da sie in keiner Beziehung zur Zündenergie stehen und werden hier nur der Vollständigkeit halber erwähnt (für T5 sind derzeit keine Stoffe bekannt.).

Hingegen ist eine Einteilung in Explosionsgruppen zur Beurteilung elektrostatischer Zündgefahren außerordentlich nützlich. In elektrostatischen Gasentladungen (siehe Kapitel 4) werden Ladungen transferiert, deren Höhe eine Abschätzung der freigesetzten Energie und damit deren Zündpotential ermöglicht.

In einem gewissen Verhältnis zur Explosionsgruppe steht eine sogenannte experimentell ermittelte Grenzspaltweite (maximum experimental safe gap, MESG), die bei der „druckfesten Kapselung“ elektrotechnischer Geräte (EN 60079-1 [2]) angewendet wird.

Die Betrachtungsweise beruht darauf, dass bei einer erfolgten Zündung in einem druckfesten Gehäuse durch einen Spalt nur eine geringe Energiemenge nach außen durchtreten kann. Diese austretende Energie, begrenzt durch die

Spaltweite, liegt unterhalb der MZE der das Gehäuse umgebenden gefährlichen explosionsfähigen Atmosphäre. Die Grenzspaltweite ist auch für die Dimensionierung von Flammensperren von Bedeutung.

1.2 Explosionsgrenzen

Bereits in Abschn. 1.1 wurde ausgeführt, dass sich in Gemischen brennbarer Gase und Stäube mit Luft eine selbstständige Verbrennung nur innerhalb bestimmter Brennstoffkonzentrationen fortpflanzen kann. Die Grenzkonzentrationen, bei denen das gerade noch möglich ist, sind als obere und untere Explosionsgrenze definiert: Unterhalb der unteren Explosionsgrenze enthält das Gemisch zu wenig Brennstoff, es ist zu „mager“, oberhalb der oberen Explosionsgrenze mangelt es an Sauerstoff, das Gemisch ist zu „fett“.

Die Explosionsgrenzen werden gemeinhin als Volumenanteil des brennbaren Gases, bezogen auf das Gesamtvolumen des Gemisches in Prozent angegeben und sind normalerweise auf Raumtemperatur und Atmosphärendruck bezogen. Eine Erhöhung des Anfangsdruckes und/oder der Anfangstemperatur führt generell zu einer Erweiterung der Explosionsgrenzen. Falls der Sauerstoffgehalt von dem der atmosphärischen Luft abweicht, so beeinflusst das die untere Explosionsgrenze nur marginal. Demgegenüber wird die obere Explosionsgrenze zu wesentlich höheren Werten hin verlagert. Grund dafür ist, dass an der oberen Explosionsgrenze Sauerstoffmangel herrscht und so der Ersatz von Stickstoff durch Sauerstoff eine Verschiebung zu höheren Brennstoffkonzentrationen bewirkt.

1.2.1 Explosionsgrenze bei Gasen

Über jeder Flüssigkeitsoberfläche bildet sich nach Maßgabe ihres Dampfdruckes und der Temperatur eine bestimmte Dampfkonzentration aus. Abbildung 1.2 zeigt die Dampfdruckkurve mit den darin eingetragenen Gemischbereichen. Demnach besteht Explosionsfähigkeit nur innerhalb des Explosionsbereiches, der durch die untere (bei 12 °C) und die obere Explosionstemperatur (bei 37 °C) begrenzt ist.

Anstelle dieser Explosionstemperaturwerte (früher Explosionspunkte genannt) können auch die daraus resultierenden Explosionsgrenzen zur Kennzeichnung des Explosionsbereiches herangezogen werden. Im explosionsfähigen Bereich setzt sich eine Flamme nach erfolgter Zündung ohne weitere Energiezufuhr und ohne weiteren Brenngas- oder Luftzutritt im gesamten Volumen fort. Zu beachten ist aber, dass innerhalb des Explosionsbereiches sowohl der Bedarf an Zündenergie als auch die erreichte Flammengeschwindigkeit von der jeweils herrschenden Konzentration abhängen.

1.2.2 Flammpunkt

Es hat sich als zweckmäßig erwiesen, die untere Explosionstemperatur durch den nahezu identischen Flammpunkt zu kennzeichnen, der meist knapp darüber liegt. Der Flammpunkt (°C) ist die unter Normalbedingung in einer definierten

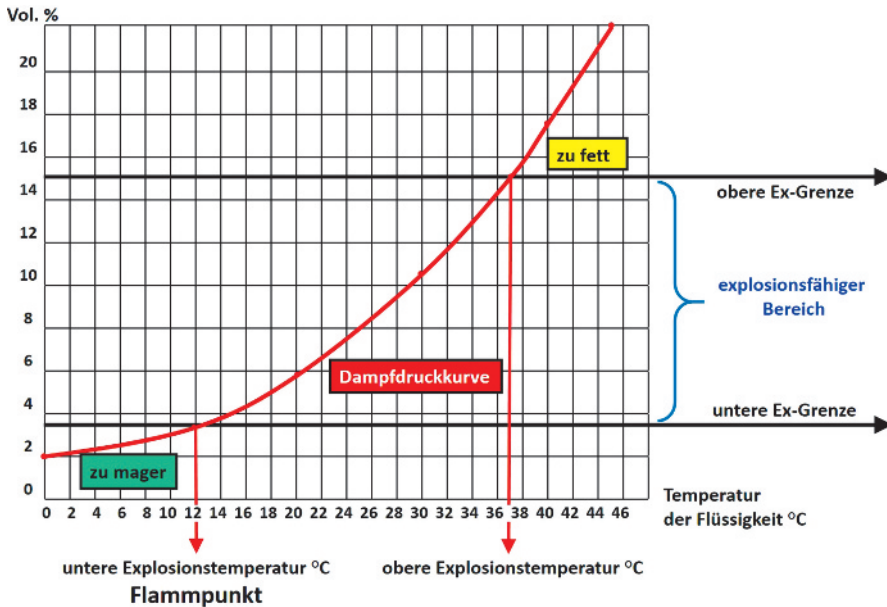


Abb. 1.2 Dampfdruckkurve für Ethanol.

Prüfapparatur bestimmte niedrigste Temperatur, bei der sich über der Flüssigkeitsoberfläche ein brennbares Gemisch zu bilden beginnt (siehe Abschn. 6.10.1).

1.2.2.1 Kennzeichnung brennbarer Flüssigkeiten

Nach TRGS 509 [3] gelten Flüssigkeiten als brennbar, wenn ihr Flammpunkt $< 370^{\circ}\text{C}$ ist. Bis 2002 war in Deutschland hierfür die „Verordnung über brennbare Flüssigkeiten“ (VbF) verbindlich [4]. Sie teilte die nicht mit Wasser mischbaren Flüssigkeiten ihrem Flammpunkt (T_F) entsprechend in drei Gefährklassen ein:

- Gefährklasse A1: $T_F < 21^{\circ}\text{C}$ (z. B. Ottokraftstoff),
- Gefährklasse A2: T_F von $21\text{--}55^{\circ}\text{C}$ (z. B. Xylol),
- Gefährklasse A3: T_F von $55\text{--}100^{\circ}\text{C}$ (z. B. Dieselloftstoff).

Die mit Wasser mischbaren entzündbaren Flüssigkeiten (z. B. Alkohole) wurden, sofern ihr Flammpunkt unter 21°C liegt, in der Gefährklasse B zusammengefasst, woraus sich nützliche Hinweise sowohl für die elektrostatische Aufladbarkeit als auch für die Bekämpfung von Flüssigkeitsbränden ergaben. Für den Bereich der Elektrostatik bedeutete dies, dass sich Flüssigkeiten der Gefährklasse B (auch im wasserfreien Zustand) wegen ihrer guten elektrischen Leitfähigkeit bei Strömungsvorgängen nicht gefährlich hoch aufladen.

Zur Bekämpfung von Flüssigkeitsbränden gibt der folgende Abschnitt einige Hinweise.

Würde man beispielsweise versuchen, Benzin (Gefährklasse A), das in einem Metallfass brennt, mit Wasser zu löschen, so wäre das Ergebnis in jedem Fall ein ausgedehnter Flächenbrand (siehe Abschn. 6.10.7). Er würde dadurch zustande kommen, dass sich Benzin nicht mit Wasser mischt und wegen seiner

geringeren Dichte aufschwimmt (alle entzündbaren Flüssigkeiten haben eine geringere Dichte als Wasser).

In das Fass eingeschüttetes Löschwasser würde das brennende Benzin über den Fassrand verdrängen und einen Flächenbrand herbeiführen. Hier wäre ein Abdecken des Fasses und damit der Sauerstoffentzug die einzig wirksame Löschmaßnahme (siehe Abschn. 6.10.6). Falls anstelle von Benzin beispielsweise Ethanol im Metallfass gebrannt hätte, wäre der Löschversuch mit Wasser wahrscheinlich erfolgreich, denn Ethanol ist in jedem Verhältnis mit Wasser mischbar (Gefahrklasse B). Voraussetzung ist allerdings, dass das Fass noch vor dem Überlaufen genug Löschwasser hätte aufnehmen können, um das brennende Ethanol unter seinen Flammpunkt abzukühlen (siehe Abschn. 6.10).

Abbildung 1.3 zeigt den Zusammenhang zwischen Wasseranteil und Flammpunkt. Doch nicht nur für das Löschen brennender Flüssigkeiten ist diese Kenntnis wichtig, sondern auch für erfolgreiches „Flambieren“. Die Kurve weist z. B. für einen 40%igen Rum einen Flammpunkt von 25 °C aus. Da hat sich schon so mancher Hausherr dem Gespött seiner Gäste ausgesetzt, wenn die zum Flambieren hervorgeholten Spirituosen – also Trinkalkohol (Gefahrklasse B) – vorher im Kühlschrank gelagert waren. Dann werden sich selbst hochprozentige geistige Getränke jedem unmittelbaren Flambierversuch durch „Nichtentzündbarkeit“ widersetzen. Grund: Der Flammpunkt liegt oberhalb der Flüssigkeitstemperatur.

Wird die Spirituose aber zuvor erwärmt, indem man sie z. B. in einen metallenen Löffel gibt und darin über einer Flamme aufheizt, so kann eine Zündung erfolgen, wenn der Flammpunkt erreicht ist. Dann lässt sich die erwärmte brennende Flüssigkeit getrost auch auf Eis schütten und wird dort das tun, was von ihr erwartet wurde, nämlich den Geschmack verfeinern. Man sieht, die Kenntnis dieser Zusammenhänge ist in gleicher Weise nützlich für den „Gourmet“ wie auch den Feuerwehrmann.

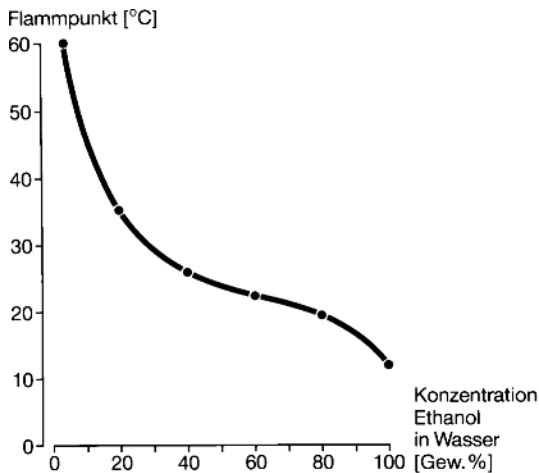


Abb. 1.3 Einfluss von Wasser auf den Flammpunkt von Ethanol.

Eine Zusammenstellung einiger derzeit bekannter Explosionsgrenzen von Gasen und Dämpfen sowie der entsprechenden Flammpunkte entzündbarer Flüssigkeiten ist im Anhang B zu finden. Die dort enthaltenen Werte wurden aus der GESTIS-Stoffenmanager[®] [5] übernommen und mit den jeweiligen CAS-Nummern versehen (Chemical Abstracts Service, CAS).

1.2.2.2 Systematiken

Durch Übernahme der Richtlinie 94/9/EG, die Sicherheits- und Schutzsysteme in explosionsgefährdeten Bereichen betrifft, wurde 2003 die über Jahrzehnte bewährte „Verordnung über brennbare Flüssigkeiten“ (VbF [4]) (Abb. 1.4) durch die Betriebssicherheitsverordnung (BetrSichV) [6] abgelöst. Doch hatte darin die Systematik der nun nicht mehr als „brennbar“, sondern als „entzündbar“ bezeichneten Flüssigkeiten nur einen kurzen Bestand (Abb. 1.5).

Zur Vereinfachung des Welthandels und gleichzeitig zum Schutz der menschlichen Gesundheit und der Umwelt wurden über einen Zeitraum von zwölf Jahren im Rahmen der Vereinten Nationen mit großer Sorgfalt harmonisierte Kriterien für Einstufung und Kennzeichnung entwickelt. Dieses „Globally Harmonised System“ (GHS) genannte Prinzip wurde 2009 veröffentlicht (Abb. 1.6). Informationen dazu lassen sich z. B. unter www.gischem.de abrufen. Seine Umsetzung

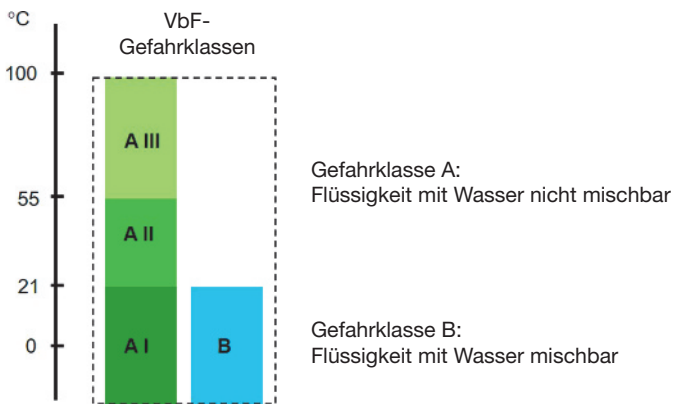





Abb. 1.4 Systematik der brennbaren Flüssigkeiten gemäß VbF (bis 2002).



Abb. 1.5 Systematik der entzündbaren Flüssigkeiten gemäß BetrSichV (2003–2009).

Kategorie	Kriterium	Gefahrenhinweis (H-Satz)	Kennzeichen (CLP)
1	Flammpunkt < 23 °C Siedebeginn < 35 °C	H 224 Flüssigkeit und Dampf extrem entzündbar	 Gefahr
2	Flammpunkt < 23 °C Siedebeginn > 35 °C	H 225 Flüssigkeit und Dampf leicht entzündbar	 Gefahr
3	Flammpunkt > 23 °C und < 60 °C	H 226 Flüssigkeit und Dampf entzündbar	 Achtung
[4] *	[Flammpunkt > 60 °C und < 93 °C]	H 227 brennbare Flüssigkeit	—

* Nur im Global Harmonisierten System zur Einstufung und Kennzeichnung von Chemikalien (GHS), nicht in die CLP-Verordnung übernommen.

Abb. 1.6 Systematik der entzündbaren Flüssigkeiten gemäß GHS und CLP (ab 2009).

erfolgt gemäß der CLP-Verordnung (Classification, Labelling and Packaging, CLP), die entsprechend der Gefahrstoffverordnung (GefStoffV) die Einstufung, Kennzeichnung und Verpackung von Stoffen und Gemischen regelt.

Ein Grund für diese erneute Änderung ist darin zu sehen, dass entzündbare Stoffe wie Flüssigkeiten und Pulver (Stäube) nun den Gefahrstoffen zugerechnet werden und damit der Gefahrstoffverordnung unterliegen.

Zur Einstufung entzündbarer Flüssigkeiten sind Daten über den Flammpunkt und den Siedebeginn erforderlich, die durch Prüfung ermittelt, der Literatur entnommen oder berechnet werden können (z. B. Anhang B).

1.2.3 Mindestzündenergie

Um in einem Brennstoff-Luft-Gemisch eine selbstständig fortschreitende Flammenreaktion in Gang zu bringen, muss die von der Zündquelle freigesetzte Energie einen bestimmten Grenzwert überschreiten. Dieser ist stark von der Konzentration des Brennstoffes im Gemisch (Abb. 1.7) abhängig, aber auch von der Geometrie der Elektroden und dem Strom-Spannungs-Verlauf der Entladung. Der niedrigste Wert der Zündenergie, der sich für das zündwilligste Gemisch ergibt, wird mit Mindestzündenergie (MZE) bezeichnet.

Es ist jedoch problematisch, einer Zündquelle, wie sie in der Praxis z. B. in Form einer Flamme oder eines Schlagfunkens vorkommt, eine definierte Energie zuzuordnen. Wesentlich überschaubarer ist hingegen die Situation bei Entladungsfunken von aufgeladenen Kondensatoren (siehe Abschn. M.5). Daher ist die MZE festgelegt als die kleinste in einem idealen Kondensator¹⁾ gespeicherte elektrische Energie, die bei der Entladung über eine zündoptimierte Funkenstrecke ausreicht, das zündwilligste Gemisch aus Brennstoff (Gas oder Staub) und Luft bei Atmosphärendruck und Raumtemperatur zu entzünden.

1) Ein idealer Kondensator kann seine gespeicherte Energie in sehr kurzer Zeit zu 100 % wieder abgeben. Er besitzt eine konstante Kapazität, sein Isolationswiderstand ist unendlich, die Wirkung des vom Strom verursachten magnetischen Feldes ist null.

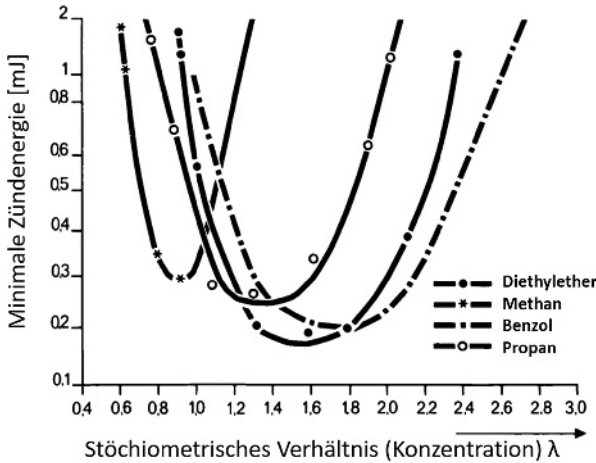


Abb. 1.7 Abhängigkeit der Zündenergie von der Gemischkonzentration.

Dabei ist durch Variation der Parameter des Entladekreises (Kapazität, Spannung, Form und Abstand der Elektroden, Entladedauer) der kleinste zur Entzündung des Gemisches ausreichende Energiewert festzustellen. Zu beachten ist ferner, dass bei der Bildung des Kondensatorfunken elektrische Energie im Kondensator und in den Zuleitungen zur Funkenstrecke verloren geht und auch noch während der Entladung selbst in Form von Strahlung und Druck Energie abgegeben wird. Deshalb ist generell die theoretisch zur Zündung notwendige Mindestenergie stets geringer als die gemessene MZE (siehe Tab. 1.2). Dessen ungeachtet ist die MZE im Hinblick auf elektrostatische Zündungen eine wichtige Kennzahl. Mit ihr lässt sich beurteilen, ob eine elektrostatische Gasentladung zur Zündgefahr werden kann (siehe Abschn. 4.5).

Wie bereits dargelegt, wird die Flammenreaktion innerhalb des Explosionsbereiches von der jeweils herrschenden Brennstoffkonzentration beeinflusst (siehe Abschn. 1.2.1).

Das zündwilligste Gemisch ist zugleich auch das reaktionsfähigste. Es findet sich in der Nähe des sogenannten stöchiometrischen Verhältnisses von $\lambda = 1$, welches besagt, dass die einer chemischen Reaktion (z. B. Flamme) zugeführten Komponenten ohne Rest in neuen Verbindungen (z. B. Kohlendioxid und Wasser) aufgehen. Man sollte erwarten, dass der Bedarf an Zündenergie meist beim stöchiometrischen Gemisch $\lambda = 1$ dann ein Minimum durchläuft.

Im Abb. 1.7 ist der aus Messungen ermittelte Zündenergiebedarf für einige Gasgemische dargestellt. Dabei fällt auf, dass die minimale Zündenergie etwas vom stöchiometrischen Verhältnis $\lambda = 1$ abweicht. Ursache sind die für die einzelnen Brennstoffe im Vergleich zum Sauerstoff unterschiedlichen Diffusionsgeschwindigkeiten, die vom jeweiligen Molekulargewicht abhängen. Falls die Diffusionsgeschwindigkeit eines Gases (hier z. B. Methan) aufgrund seines geringeren Molekulargewichtes größer ist als die von Sauerstoff, würde es in der Verbrennungszone zu einem Brenngasüberschuss kommen. Zur Anpassung muss daher der Brenngasanteil zur geringeren Konzentration hin verschoben werden. Entsprechend umgekehrt sind die Verhältnisse bei den Brenngasen

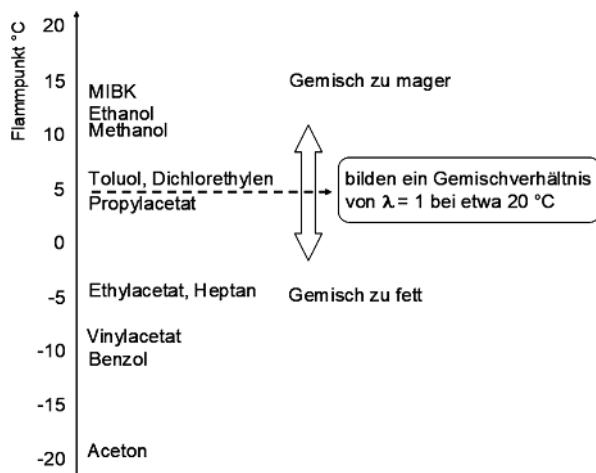


Abb. 1.8 Zusammenhang zwischen Flammpunkt und Gemischverhältnis „ $\lambda = 1$ “.

(Dämpfen), deren Dichte höher ist als die von Sauerstoff. Diese Kenntnis ist insofern bedeutsam, als elektrostatische Zündquellen vorwiegend nur geringe Energiebeträge freisetzen.

Ein diesbezügliches Beispiel: Bei Raumtemperatur ist Toluol als entzündbare Flüssigkeit in der Unfallstatistik überproportional häufig von Zündungen infolge elektrostatischer Aufladungen betroffen (siehe Abschn. 1.4). Grund dafür ist, dass sich die MZE stets nahe des stöchiometrischen Verhältnisses Brennstoff zu Luft von $\lambda = 1$ findet. Abbildung 1.8 zeigt für einige Lösemittel, wie dieses Verhältnis bei Raumtemperatur vom Flammpunkt abhängt. Bei 20 °C bilden die Flüssigkeiten Toluol und 1,2-Dichlorethylen und *i*-Propylacetat mit einem Flammpunkt von etwa 5 °C optimal zündfähige Gemische (Flammpunkte gem. Nabert/Schön [7]). Hingegen kommt es bei Flüssigkeiten mit tieferen Flammpunkten, z. B. Benzin (Ottokraftstoff) ca. –30 °C, zur Bildung „fetter“ Gemische (Brennstoffüberschuss), darüber angesiedelte Flüssigkeiten, z. B. Dieselloftstoff, befinden sich im Gemischbereich „mager“ (Brennstoffmangel).

1.2.4 Explosionsgrenze bei Stäuben

Die für Brenngasgemische angestellten Überlegungen lassen erahnen, wie komplex die Verhältnisse bei brennbaren Staubgemischen sind. Während bei Gasmischungen, nachdem sie einmal hergestellt sind, die Homogenität erhalten bleibt, ist bei den in Luft durch Aufwirbelung dispergierten Stäuben weder eine räumliche noch eine zeitliche Konstanz ihrer Verteilung zu erwarten.

Prinzipiell gelten für Stäube die gleichen Bedingungen für die MZE wie bei Gasen, das bedeutet, sie liegt etwa beim stöchiometrischen Verhältnis $\lambda = 1$. Nur ist es bei Stäuben erheblich schwieriger, diese Bedingung in zeitlicher und räumlicher Koinzidenz an der Messfunkenstrecke zu erfüllen. Dementsprechend sind auch die für Stäube ermittelten Mindestzündenergiewerte mit einem höheren Fehler behaftet als die der Gase. Erschwerend kommt noch hinzu, dass

der Zündenergiebedarf der Stäube maßgeblich von deren Aufbereitungszustand (z. B. Teilchengröße und -verteilung) abhängt.

Im Gegensatz zu Gasen und Dämpfen gibt es wegen der zeitlich und örtlich begrenzten Verteilung von Stäuben in Luft keine homogenen Staub-Luft-Gemische. Deshalb kommt ihren unteren und oberen Explosionsgrenzen – angegeben in g/m^3 – auch keine so hohe sicherheitstechnische Bedeutung zu wie denen bei Dampf-Luft-Gemischen. In meist unzulässiger Vereinfachung wird als Staubkonzentration häufig die Gesamtmenge des Staubes im Gesamtvolumen eines Apparates (z. B. Zerstäubungstrockner) betrachtet und eine gleichförmige Verteilung angenommen. Es können aber örtlich völlig andere Staubkonzentrationen vorliegen, da eine summarische Abschätzung nicht die jeweiligen Konzentrationen im Teilvolumen beschreiben kann.

Für die meisten brennbaren Stäube ist die untere Explosionsgrenze bei etwa 20 bis 50 g/m^3 zu finden. Es gibt allerdings auch einige besonders zündempfindliche Stäube, deren untere Explosionsgrenze schon bei etwa 10 g/m^3 liegt.

Eine obere Explosionsgrenze ist bei Stäuben experimentell schlecht zu ermitteln, da die hier zu betrachtenden Konzentrationen von etwa 1 kg/m^3 und höher nur schwierig im Versuch aufrechtzuerhalten sind.

1.2.5 Einteilung in Explosionsgruppen

Gefahrstoffe, die zu Brand- und Explosionsgefahren führen können, werden in die Explosionsgruppen I, II und III eingeteilt. Diese Klassifikation soll auch dazu beitragen, dementsprechend Geräte für einen sicheren Einsatz in explosionsgefährdeten Bereichen zu definieren. Dafür zuständig ist der Ausschuss für Gefahrstoffe (AGS) bei der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA, www.baua.de).

Die Explosionsgruppe I gilt nur für explosionsgefährdete Bereiche unter Tage (Bergbau). Die Explosionsgruppen II und III gelten für sämtliche explosionsgefährdeten Bereiche über Tage, die durch Gase und Stäube herbeigeführt werden. Zur Explosionsgruppe II zählen entzündbare Gase und die Dämpfe entzündbarer Flüssigkeiten, eingeteilt in die Explosionsgruppen IIA, IIB und IIC, wobei die Zündempfindlichkeit von IIA nach IIC ansteigt (siehe Tab. 1.2).

Die Explosionsgruppe III betrifft brennbare, fein verteilte Feststoffe (Pulver, Stäube), die Explosionsgefahren herbeiführen können. Sie werden nach DIN EN 60079-0 [8] nicht hinsichtlich ihrer Zündempfindlichkeit, sondern nach den folgenden Merkmalen unterschieden:

- Gruppe IIIA: brennbare Flusen, z. B. Flock,
- Gruppe IIIB: nicht leitfähiger Staub, z. B. Pulverlacke,
- Gruppe IIIC: leitfähiger Staub, z. B. Metallstaub.

1.3 Zündgefahren infolge elektrostatischer Aufladungen

Den aus elektrostatischen Aufladungen resultierenden unterschiedlichen Arten von Gasentladungen (siehe Kap. 4) können entsprechende Zündpotentiale

zugeordnet werden (siehe Abschn. 4.5). Dem soll hier nicht vorgegriffen werden, doch die beim Umgang mit isolierenden Stoffen unvermeidbaren Büschelentladungen werden schon jetzt Erwähnung finden.

1.3.1 Zündgefahr durch Büschelentladungen

Im Juni 2003 kam ein europäisches Regelwerk (CENELEC) über die Vermeidung von Gefahren infolge elektrostatischer Aufladungen (CLC/TR 50404) heraus, dessen Inhalt weitgehend in die nachfolgenden deutschen und internationalen Regelwerke übernommen wurde. Die TRBS 2153 [9] wurde 2016 in die TRGS 727 [10] als Bestandteil der Gefahrstoffverordnung (GefStoffV) überführt. Darin wird u. a. ausgesagt, dass aufgeladene Isolierstoffe – das können Packmaterialien oder Maschinenteile aus Kunststoff, aber auch aufgeladene Flüssigkeitsoberflächen und Pulverschüttungen sein – zu angenäherten leitfähigen Teilen Büschelentladungen (siehe Abschn. 4.2.2.2) herbeiführen können. Diese müssen für nahezu alle brennbaren Gase und entzündbaren Flüssigkeiten (Explosionsgruppen IIA bis IIC) als zündfähig angesehen werden.

Immer wieder kam in der Vergangenheit die Frage auf, ob Büschelentladungen auch für Stäube eine Zündgefahr darstellen. Kaum jemand wird vermuten, dass einer endgültigen Klärung dieser Angelegenheit über viele Jahre heftige Diskussionen vorausgegangen waren, galt es doch nachzuweisen, dass ein bestimmtes Ereignis *nicht* eintreten kann. Theoretisch ist ein solcher Nachweis auch nicht möglich. Ausschlaggebend war letzten Endes, dass – trotz umfangreicher Versuche – keine entsprechenden Zündungen bekannt geworden sind. So ist nun in den Regelwerken festgeschrieben, dass nach gegenwärtigem Kenntnisstand Büschelentladungen staubförmige Produkte nicht zu entzünden vermögen (Ausnahme: extrem zündempfindliche Stäube mit einer MZE < 3 mJ). Weshalb ist diese Festlegung eigentlich so wichtig? Es wäre sonst erforderlich, die Größe isolierender Packmittel für pulverförmige, brennbare Produkte, wie z. B. Puderzucker, drastisch zu begrenzen, wie es entsprechend für entzündbare Flüssigkeiten der Fall ist.

1.3.2 Hybridgemische

Als hybride Gemische [☐ P7] werden Kombinationen von brennbarem Staub und brennbaren Gasen bezeichnet. Es besteht also eine erhöhte Zündgefahr, wenn zu pulverförmigen Produkten brennbare Gase oder Dämpfe hinzutreten, weil deren Zündenergie in aller Regel geringer ist, als die von Staub-Luft-Gemischen. Zu einem gefährlichen Hybridgemisch kommt es bereits, wenn die Gas- oder Dampfkonzentration noch unterhalb der unteren Explosionsgrenze liegt, weil sich schon dann ein explosionsfähiges Gemisch bilden kann, dessen MZE niedriger ist als die der reinen Staubwolke. Das Risiko wird dadurch noch gesteigert, weil das Verhältnis von Ladung zu Masse bei Pulvern im Allgemeinen viel größer ist als bei Flüssigkeiten. So können bereits kleine Pulvermengen Büschelentladungen herbeiführen.

Ein weiterer Umstand ist bei Hybridgemischen noch zu beachten: Sie sind bereits explosionsfähig, wenn sowohl die Konzentration des Staubes wie auch die des Gases unterhalb ihrer jeweiligen Explosionsgrenzen liegen.

1.4 Perspektive zur Gefahrenbeurteilung

An den folgenden drei allgemein bekannten, entzündbaren Flüssigkeiten soll das Gefährdungspotential bei ihrer Handhabung beispielhaft abgeschätzt werden (Tab. 1.3).

Tab. 1.3 Beispiel Gefahrenbeurteilung.

	Zündtemperatur [°C]	Flammpunkt [°C]	Mindestzündenergie [mJ]
Benzin (Ottokraftstoff)	ca. 220	> -35	ca. 0,23
Toluol	535	6	0,24
Dieselmkraftstoff	> 225	> 56	0,23

Die Flüssigkeiten befinden sich bei Raumtemperatur in Metallfässern.

Frage: Bei welcher der drei Flüssigkeiten ist die Gefahr am größten, durch einen Piezogasanzünder (schwache Funkenentladung wie z. B. von einer aufgeladenen Person verursacht (siehe Abschn. 6.8.1)) entzündet zu werden?

Auf den ersten Blick hin scheint Toluol wegen seiner hohen Zündtemperatur am wenigsten gefährdet zu sein. Doch das trügt, denn die elektrostatischen Gasentladungen weisen stets Temperaturen auf, die weit über den höchsten zu erwartenden Zündtemperaturen liegen. Relevant wäre nur die MZE, doch die ist für die drei Flüssigkeiten gleich groß.

Ein „Gedankenexperiment“ soll auf anschauliche Weise weiterhelfen.

Achtung: Das darf auf keinen Fall durch Experimente realisiert werden!

- Die Fässer sind jeweils bis zum Spund gefüllt. Was geschieht, wenn den Spunden jeweils ein Piezogasanzünder angenähert wird?
 - Bei Benzin und Toluol entsteht eine Flamme, es brennt am Spundloch.
 - Beim Dieselmkraftstoff erfolgt keine Reaktion.

Grund:
Die Flammpunkte von Benzin und Toluol sind überschritten, hingegen liegt der Flammpunkt von Dieselmkraftstoff oberhalb der Raumtemperatur.
- Die Fässer werden zur Hälfte entleert. Was geschieht nun, wenn der Piezogasanzünder in den Gasraum des Fasses hineingeführt wird?
 - Keine Reaktion bei Benzin, da Gemisch „zu fett“,
 - Explosion bei Toluol, da Gemisch im Ex-Bereich,
 - keine Reaktion bei Dieselmkraftstoff, da Gemisch „zu mager“.
- Die Fässer werden entleert, aber nicht gereinigt. Wo kommt es zur Zündung?
 - Keine Reaktion bei Benzin, da Gemisch „zu fett“,
 - Explosion bei Toluol, da Gemisch im Ex-Bereich,
 - keine Reaktion bei Dieselmkraftstoff, da Gemisch „zu mager“.

- 4) Die Fässer werden nach dem Entleeren mit spülmittelhaltigem Wasser einmal befüllt und wieder entleert. Kann es denn jetzt noch zur Zündung kommen?
- Explosion bei Benzin, da Gemisch jetzt im Ex-Bereich,
 - keine Reaktion bei Toluol, da Gemisch „zu mager“,
 - keine Reaktion bei Dieseldieselkraftstoff, da Gemisch „zu mager“.

Daraus folgt:

Bei Raumtemperatur geht die größte Gefahr von Toluol aus, denn über seiner Oberfläche herrscht stets ein explosionsfähiges Gemisch (stöchiometrisches Verhältnis $\lambda = 1$ wird bei 20 °C erreicht (siehe Abb. 1.8)).

Benzin ist bei Raumtemperatur weit weniger gefährlich, denn im abgeschlossenen Volumen (Tank) ist die Atmosphäre stets „zu fett“. Das ist der Grund, weshalb Benzin nicht nur von Fachkräften, sondern von „jedermann“ in Fahrzeugtanks aus aufladbarem Kunststoff (vorzugsweise Polyethylen) eingefüllt werden darf. Schon kurz nach Beginn der ersten Betankung herrscht im Kraftstofftank ein fettes Gemisch, im Tank wird es daher nicht zu einer Explosion kommen. Lediglich im oberen Teil des Tankeinfüllstutzens kann – wie am erwähnten Spundloch – ein Brand entstehen (siehe Abschn. 7.5.8). Auch falls der Tank völlig leer gefahren wurde, besteht keine Explosionsgefahr, das Gemisch ist auch dann noch zu fett. Lediglich bei der Erstbetankung oder nach einer restlosen Tankentleerung, z. B. bei Instandsetzungsarbeiten, besteht Explosionsgefahr im Fahrzeugtank [11]. Selbst bei einem Fahrzeugbrand explodiert der Benzintank nicht, er kann aber infolge des in seinem Innern sich entwickelnden Dampfdruckes bersten und eine Stichflamme herbeiführen.

Andererseits stellt ein entleertes und anschließend mit Wasser ausgespültes Benzinfass eine enorme Gefahr dar, denn erst jetzt kommt dort die Dampfkonzentration in den Ex-Bereich. Das hat schon oft zu leidvollen Erfahrungen beim Arbeiten (Schleifen, Bohren, Schweißen usw.) an „gereinigten“ Benzinfässern geführt.

Es ist zu beachten: Etwa 5 ml Benzin genügen, um ein 200-l-Fass mit explosionsfähiger Atmosphäre zu füllen (Abb. 1.9)!

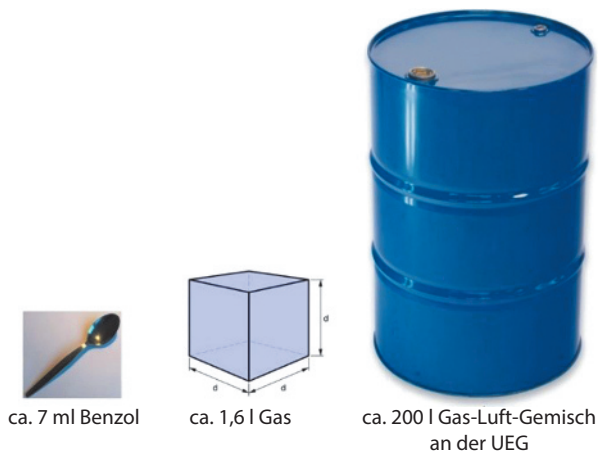


Abb. 1.9 Entflammbare Flüssigkeit – zündfähiges Gemisch.

Keine Gefahren gab es bei Dieselmotorkraftstoff (Flammpunkt $> 56^\circ\text{C}$). So ist es mit allen entzündbaren Flüssigkeiten, die bei Temperaturen unterhalb ihres Flammpunktes verarbeitet werden.

Achtung: Nach TRGS 509 [3] ist aus Sicherheitsgründen die Flüssigkeitstemperatur bei reinen Flüssigkeiten 5 K oder bei Gemischen 15 K unter dem Flammpunkt der Flüssigkeiten zu halten.

1.5 Sicherheitstechnische Bewertung in Bezug auf elektrostatische Zündgefahren

Ende des 19. Jahrhunderts kam es in der größten Wäscherei Hamburgs zu unerklärlichen Bränden bei der Textilreinigung mit Benzin. Sie wurden auf elektrostatische Entladungen zurückgeführt. Die daraus getroffene Schlussfolgerung, alle elektrisch leitfähigen Anordnungen einschließlich Personen zu erden, wurde 1906 in die Unfallverhütungsvorschriften der Berufsgenossenschaften aufgenommen.

1.5.1 Anforderungen an Arbeitsmittel (Auszug aus BetrSichV [6])

„Die Arbeitsmittel müssen so gestaltet sein, dass eine gefährliche elektrostatische Aufladung vermieden oder begrenzt wird. Ist dies nicht möglich, müssen sie mit Einrichtungen zum Ableiten solcher Aufladungen ausgestattet sein.“

Der erste Schritt bei der Planung und Auswahl explosionsgeschützter Betriebsmittel ist die Einteilung der Betriebs- und Anlagenbereiche in Explosionsschutzzonen durch den Betreiber der Anlagen. Dahinter steht die Überlegung, dass in Bereichen, in denen es nur kurzzeitig zur Bildung explosionsfähiger Atmosphären kommt, eine selten auftretende Zündquelle ein geringeres Risiko darstellt, als in den Bereichen, in denen langfristig mit einer Explosionsgefahr zu rechnen ist – und umgekehrt.

Der Betreiber ist zusätzlich verpflichtet, ein Explosionsschutzdokument zu erstellen und dort zu dokumentieren. Der Arbeitgeber hat vor der Verwendung von Arbeitsmitteln die auftretenden Gefährdungen zu beurteilen. Das Vorhandensein einer CE-Kennzeichnung (EU-Konformitätserklärung) am Arbeitsmittel entbindet nicht von der Pflicht zur Durchführung einer Gefährdungsbeurteilung.

1.5.2 Einteilung explosionsgefährdeter Bereiche in Gefahrenzonen

Das umfangreichste Regelwerk über Explosionsgefahren waren die „Explosionsschutz-Regeln BGR 104“ der BGRCI, die 2016 in die DGV-Regel 113 überführt wurden [12]. Sie stellen eine Sammlung technischer Regeln für das Vermeiden der Gefahren durch eine explosionsfähige Atmosphäre mit Beispielsammlung zur Einteilung explosionsgefährdeter Bereiche in Zonen dar.

Ein Bereich ist explosionsgefährdet, wenn in ihm eine explosionsfähige Atmosphäre auftreten kann. Dementsprechend werden explosionsgefährdete Bereiche weltweit nach Häufigkeit und Dauer des Auftretens einer gefährlichen

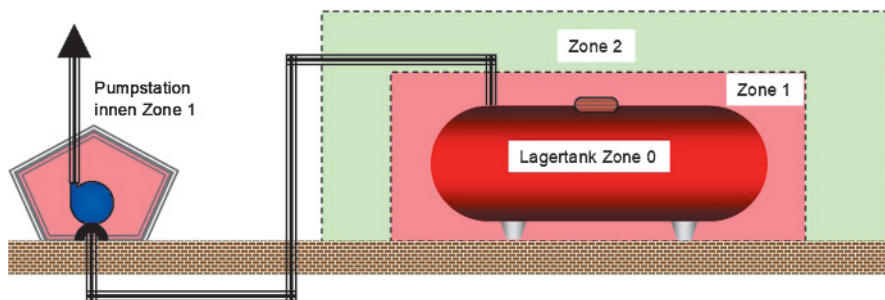


Abb. 1.10 Beispielhafte Zoneneinteilung nach ATEX [15].

explosionsfähigen Atmosphäre in Gefahrenzonen unterteilt. Unterschieden wird in Bereiche, die durch brennbare Gase, Dämpfe oder Nebel explosionsgefährdet sind (DIN EN 60079-10-1 [13]) und solche, in denen brennbare Stäube auftreten können oder vorhanden sind (DIN EN 60079-10-2) [14].

Die Definitionen der Gefahrenzonen (Explosionsschutz-Regeln [12]) sind nachstehend gelistet und mit beispielhaften Erläuterungen zu den entsprechenden Bereichen versehen [T6]. Eine kritische Notiz zur Einteilung in Gefahrenzonen findet sich in Abschn. 7.2. Die Zonendefinitionen sind auf der Basis der Richtlinie 1999/92/EG in allen EU-Mitgliedstaaten gleich. In den USA gelten diese Definitionen nicht.

1.5.2.1 Explosionsgefahren durch Gase, Dämpfe oder Nebel

Vorbemerkung: Als „Normalbetrieb“ gilt der Zustand, in dem Anlagen innerhalb ihrer Auslegungsparameter benutzt werden (gemäß BetrSichV).

Lässt sich die Wahrscheinlichkeit des Wirksamwerdens einer Zündquelle entsprechend der Zulässigkeit nach der Zoneneinteilung des Bereichs, in dem sie sich befindet, nicht abschätzen, ist die Zündquelle als dauernd wirksam zu betrachten (Abb. 1.10).

Zone 0 ist ein Bereich, in dem eine gefährliche explosionsfähige Atmosphäre als Gemisch aus Luft und brennbaren Gasen, Dämpfen oder Nebeln ständig, über lange Zeiträume oder häufig vorhanden ist.

Anmerkung: Der Begriff „häufig“ ist im Sinne von „zeitlich überwiegend“ zu verwenden.

Hierzu gehört in aller Regel nur das Innere von Behältern oder das Innere von Apparaturen, wenn die Bedingungen der Definition der Zone 0 erfüllt sind.

Zone 1 ist ein Bereich, in dem sich bei Normalbetrieb gelegentlich eine gefährliche explosionsfähige Atmosphäre als Gemisch aus Luft und brennbaren Gasen, Dämpfen oder Nebeln bilden kann.

Hierzu können u. A. gehören:

- die nähere Umgebung der Zone 0,
- die nähere Umgebung von Beschickungsöffnungen,
- der nähere Bereich um Befüll- und Entleerungseinrichtungen,
- der nähere Bereich um leicht zerbrechliche Apparaturen oder Leitungen aus Glas, Keramik und dergleichen,

- der nähere Bereich um nicht ausreichend dichtende Stopfbuchsen, z. B. an Pumpen oder Schiebern,
- das Innere von Apparaturen wie Verdampfer und Reaktionsgefäße.

Zone 2 ist ein Bereich, in dem bei Normalbetrieb eine gefährliche explosionsfähige Atmosphäre als Gemisch aus Luft und brennbaren Gasen, Dämpfen oder Nebeln normalerweise nicht oder aber nur kurzzeitig auftritt.

Zur Zone 2 können u. a. gehören Bereiche, welche die Zone 0 und 1 umgeben.

1.5.2.2 Explosionsgefahren durch Pulver oder Stäube

Zone 20 ist ein Bereich, in dem eine gefährliche explosionsfähige Atmosphäre in Form einer Wolke aus in der Luft enthaltenem brennbarem Staub ständig, über lange Zeiträume oder häufig vorhanden ist.

Anmerkung: Der Begriff „häufig“ ist im Sinne von „zeitlich überwiegend“ zu verwenden.

Diese Bedingungen sind im Allgemeinen nur im Innern von Behältern, Rohrleitungen, Apparaturen usw. anzutreffen.

Anmerkung: Bereiche, in denen es zu Staubablagerungen kommt, aber Staubwolken nicht ständig, dauernd oder häufig auftreten, sind in diese Zone nicht mit einbezogen.

Zone 21 ist ein Bereich, in dem sich bei Normalbetrieb gelegentlich eine gefährliche explosionsfähige Atmosphäre in Form einer Wolke aus in der Luft enthaltenem brennbarem Staub bilden kann.

Hierzu zählen auch die unmittelbare Umgebung von z. B. Pulverentnahme oder Pulverfüllstationen und Bereiche, in denen Staubablagerungen auftreten und bei Normalbetrieb durch Aufwirbelung eine explosionsfähige Konzentration von brennbarem Staub im Gemisch mit Luft bilden können.

Zone 22 ist ein Bereich, in dem bei Normalbetrieb eine gefährliche explosionsfähige Atmosphäre in Form einer Wolke aus in der Luft enthaltenem brennbarem Staub normalerweise nicht oder aber nur kurzzeitig auftritt.

Anmerkung: Schichten, Ablagerungen und Aufhäufungen von brennbarem Staub sind wie jede andere Ursache, die zur Bildung einer gefährlichen explosionsfähigen Atmosphäre führen kann, zu berücksichtigen (gemäß BetrSichV).

Dazu gehören auch Bereiche, in denen Staub aus Undichtheiten der Apparaturen austreten kann. Die ausgetretenen Stäube können Staubablagerungen in gefährdender Menge bilden (z. B. Mühlenräume, in denen Staub aus den Mühlen entweichen und sich ablagern kann).

Weitere Beispiele für die Einteilung explosionsgefährdeter Bereiche sind in der Beispielsammlung der Explosionsschutz-Regeln – DGUV-Regel 113 [12] – zu finden.

1.6 Geräteschutzniveau (EPL)

„EPL“ steht für den englischen Ausdruck „equipment protection level“ und bedeutet übersetzt „Geräteschutzniveau“. Zu seiner Anwendung werden die Geräte in Kategorien eingeteilt, die den Explosionsschutzzonen zugeordnet sind (Tab. 1.4).

Tab. 1.4 Zusammenhang Zone – Kategorie.

Zone	Gerätekategorie	Geeignet für
0	1 G	Gas-Luft-Gemisch, Dampf-Luft-Gemisch bzw. Nebel
1	2 G	Gas-Luft-Gemisch, Dampf-Luft-Gemisch bzw. Nebel
2	3 G	Gas-Luft-Gemisch, Dampf-Luft-Gemisch bzw. Nebel
20	1 D	Staub-Luft-Gemisch
21	2 D	Staub-Luft-Gemisch
22	3 D	Staub-Luft-Gemisch

Nach DIN EN 60079-0:2011 [8] werden Geräte für explosionsgefährdete Bereiche in drei Schutzniveaus kategorisiert (Ausnahme: Bergbau). *Der Buchstabe G steht dabei für gasexplosionssgeschützte Geräte, der Buchstabe D für staubexplosionssgeschützte Geräte.*

1.6.1 Gerätekategorien

Sofern im Explosionsschutzdokument unter Zugrundelegung der Ergebnisse der Gefährdungsbeurteilung nichts anderes vorgesehen ist, sind in explosionsgefährdeten Bereichen Geräte und Schutzsysteme entsprechend den Kategorien gemäß der Explosionsschutzverordnung (11. ProdSV [16]) in Verbindung mit der Richtlinie 94/9/EG auszuwählen (Tab. 1.5).

Anmerkung: Die 11. ProdSV (Explosionsschutzprodukteverordnung vom 6. Januar 2016 (BGBl. I S. 39) dient der Umsetzung der Richtlinie 2014/34/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 26. Februar 2014 zur Harmonisierung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten für Geräte und Schutzsysteme zur bestimmungsgemäßen Verwendung in explosionsgefährdeten Bereichen (ABl. L 96 vom 29.3.2014, S. 309).

Kategorie 1: Gerät mit „sehr hohem“ Schutzniveau zur Verwendung in explosionsgefährdeten Bereichen, bei denen bei Normalbetrieb, vorhersehbaren oder seltenen Fehlern/Fehlfunktionen keine Zündgefahr besteht.

Kategorie 2: Gerät mit „hohem“ Schutzniveau zur Verwendung in explosionsgefährdeten Bereichen, bei denen bei Normalbetrieb oder üblicherweise vorhersehbaren Fehlern/Fehlfunktionen keine Zündgefahr besteht.

Kategorie 3: Gerät mit „erweitertem“ Schutzniveau zur Verwendung in explosionsgefährdeten Bereichen, bei denen während des normalen Betriebes keine Zündgefahr besteht und die einige zusätzliche Schutzmaßnahmen aufweisen, die gewährleisten, dass bei üblicherweise zu vorhersehbaren Störungen des Gerätes keine Zündgefahr besteht.

Tab. 1.5 Gerätekategorien.

Gerätekategorie	Vermeidung wirk-samer Zündquellen	Maß an Sicherheit	Einsetzbar in Zonen	Vorhandensein explosi-onsfähiger Atmosphäre
1 (G+D)	Auch bei seltenen Betriebsstörungen	Sehr hoch	0; 1; 2 20; 21; 22	Langzeitig, ständig oder häufig
2 (G+D)	Bei üblichen Betriebsstörungen	Hoch	1; 2 21; 22	Gelegentlich
3 (G+D)	Beim Normalbe-trieb	Normal	2 22	Selten und kurzzeitig

1.6.2 Zusammenfassung

Werden Arbeitsmittel in Bereichen mit üblicherweise vorhersehbarer gefährlicher explosionsfähiger Atmosphäre verwendet oder kommt es durch deren Verwendung zur Bildung gefährlicher explosionsfähiger Atmosphäre, müssen unter Beachtung der Gefahrstoffverordnung die erforderlichen Schutzmaßnahmen getroffen werden. Insbesondere sind die für die jeweilige Zone geeigneten Geräte und Schutzsysteme zur bestimmungsgemäßen Verwendung in explosionsgefährdeten Bereichen einzusetzen [10]. Diese Schutzmaßnahmen sind vor der erstmaligen Verwendung der Arbeitsmittel im Explosionsschutzdokument gemäß der Gefahrstoffverordnung zu dokumentieren.

1.7 Explosionsgefahren in den Griff bekommen

1.7.1 Primärer Explosionsschutz

Das Substantielle zuerst, auch wenn es trivial erscheint: Stets ist zu prüfen, ob Stoffe durch solche ersetzt werden können, die keine explosionsfähigen Gemische bilden. Beispielsweise:

- entzündbare Löse- und Reinigungsmittel durch wässrige Lösungen,
- Kohlenwasserstoffe mit niedrigem Flammpunkt durch solche mit Flammpunkten hinreichend über der Verarbeitungstemperatur (siehe Abschn. 1.2.2 und 1.4),
- brennbare pulverförmige Füllstoffe durch nicht brennbare.

Lässt sich der Umgang mit Stoffen, die explosionsfähige Atmosphären zu bilden vermögen, nicht vermeiden, so kann ein hohes Sicherheitsniveau dadurch erreicht werden, dass die Bildung einer explosionsfähigen Atmosphäre in gefährdender Menge innerhalb einer Apparatur durch Begrenzung der Menge bzw. der Konzentration oder durch Inertisierung verhindert oder eingeschränkt wird.

1.7.1.1 Gefahrdrohende Menge

Mehr als 10 l zusammenhängende explosionsfähige Atmosphäre müssen in geschlossenen Räumen unabhängig von der Raumgröße grundsätzlich als gefahrdrohende Menge angesehen werden. In unmittelbarer Nähe von Menschen können bereits kleinere Mengen gefährlich sein (www.exinfo.de).

1.7.1.2 Konzentrationsbegrenzung

Bei Anwendung dieser Maßnahme muss die Konzentration der brennbaren Stoffe unterhalb der unteren oder oberhalb der oberen Explosionsgrenze gehalten werden. Dabei ist zu beachten, dass beim Anfahren und Abstellen der Anlagen der Explosionsbereich durchlaufen werden kann (siehe Abschn. 1.4).

1.7.1.3 Inertisierung

Durch Zugabe von gasförmigen Inertstoffen (z. B. Stickstoff, Kohlendioxid, Edelgase), Wasserdampf oder auch von anderen pulverförmigen Inertstoffen kann die Bildung explosionsfähiger Gemische verhindert werden [17].

1.7.2 Sekundärer Explosionsschutz

Häufig ist das „Vermeiden explosionsfähiger Atmosphäre“ (Konzentrationsbegrenzung bzw. Inertisierung) als alleinige Explosionsschutzmaßnahme nicht sinnvoll oder nicht ausreichend sicher. In solchen Fällen ist sekundärer Explosionsschutz zu planen, d. h. eine Zündung gefährlicher explosionsfähiger Atmosphären zu verhindern, z. B. durch:

- Einteilung von Ex-Bereichen in Gefahrenzonen,
- Vermeidung von verfahrensbedingten Zündquellen (siehe Abschn. 7.2.1),
- Einsatz explosionsgeschützter Betriebsmittel,
- Einsatz von aktiven oder passiven Ionisationseinrichtungen zur Beseitigung möglicher Aufladungen.

1.7.3 Tertiärer (konstruktiver) Explosionsschutz

In allen anderen Fällen müssen die Auswirkungen von Explosionen durch konstruktive (tertiäre) Schutzmaßnahmen auf ein ungefährliches Maß reduziert werden. Die Auswirkungen einer Explosion lassen sich z. B. begrenzen durch:

- explosionsdruckfeste Bauweise (maximaler Explosionsdruck),
- explosionsdruckstoßfeste Bauweise (reduzierter Explosionsdruck),
- Explosionsdruckentlastung,
- Explosionsunterdrückung.

Im Hinblick auf die Bauweise von Apparaten und Behältern unterscheidet man zwischen Ausführungen für den maximalen Explosionsdruck und Ausführungen für den durch Explosionsdruckentlastung oder Explosionsunterdrückung reduzierten Explosionsdruck. Die Festigkeit der zu schützenden Apparaturen kann dabei entweder explosionsdruckfest (Apparat hält der Explosion stand, ohne sich zu verformen) oder explosionsdruckstoßfest (Apparat kann sich verformen, ohne jedoch aufzureißen) sein.

Bei der Explosionsdruckentlastung werden Apparate mit Druckentlastungseinrichtungen versehen, z. B. Berstscheiben oder Explosionsklappen, welche die bei einer Explosion auftretenden Druckwirkungen und Flammen in eine ungefährdete Richtung entlasten. Das ist für geschlossene Räume wegen einer Gefährdung der Mitarbeiter problematisch, stattdessen bietet hier das REMBE® Q-Rohr [18] (Abb. 1.11) eine flammenlose Explosionsdruckentlastung.



Abb. 1.11 REMBE® Q-Rohr – flammenlose Druckentlastung [Quelle: Mit Genehmigung von B27].

Die Explosionsunterdrückung ist – wie die bereits erwähnte – Explosionsdruckentlastung eine Schutzeinrichtung für Apparaturen, die nicht für einen maximalen, sondern nur für einen reduzierten Explosionsdruck ausgeführt sind. Eine anlaufende Explosion im Apparat wird hierbei mittels geeigneter Detektoren erkannt und im Millisekundenbereich durch Löschmittel bekämpft, sodass sie sich nicht voll entwickeln kann. Im Gegensatz zur Schutzmaßnahme Explosionsdruckentlastung treten keine Flammen oder unverbrannte Produktreste aus.

Bei der Anwendung der o. g. Schutzmaßnahmen ist es zusätzlich notwendig, angrenzende explosionsgefährdete Anlagenteile explosionstechnisch zu entkoppeln. Hierfür stehen zahlreiche in der BGR 104, seit 2016 DGUV-Regel 113 [12] beschriebene Maßnahmen zur Verfügung (z. B. Zellenradschleusen, Löschmittelsperren, Bandsicherungen).

1.8 Zündquellenarten

Zündquellen sind in der Lage, explosionsfähige Atmosphären zu entzünden. Eine Anfang 1960 vorgenommene Auswertung einer großen Anzahl von Brand- und Explosionsunglücken hatte zum Ergebnis, dass buchstäblich insgesamt 13 verschiedene Zündquellen dafür in Betracht kamen. Mit dieser Zahl haben sich anschließend weltweit die unterschiedlichsten Experten befasst, doch es gelang

ihnen weder die Anzahl von Zündquellen zu erhöhen noch sie herabzusetzen. In den seither verflossenen 50 Jahren hat sich unter Experten international die Meinung durchgesetzt, dass tatsächlich nur die nachstehend in Tab. 1.6 gelisteten 13 Zündquellen zu beachten sind (siehe Abschn. 7.2.1).

Tab. 1.6 Zündquellen.

Nr.	Zündquelle	Beispiel
1	Heiße Oberflächen	Heiße Rohrleitung, Apparategehäuse
2	Flammen und heiße Gase	Streichholz, Abgase, Trockenluft
3	Mechanisch erzeugte Funken	Schleifen, Trennen, mech. Feuerzeug
4	Elektrische Anlagen	Elektrische Schließ- und Trennfunkten
5	Elektrische Ausgleichströme, kathodischer Korrosionsschutz	Rückströme beim Elektroschweißen, Fremdstromeinspeisung, Fahrschienen
6	Statische Elektrizität	Gasentladungen nach Trennvorgängen
7	Blitzschlag	Zündung im Blitzkanal
8	Elektromagnetische Felder, Bereich: 9 kHz bis 300 GHz	Hochfrequenzanlagen
9	Elektromagnetische Strahlung im optischen Spektralbereich	Lichtfokussierung, Fotoblitz
10	Ionisierende Strahlung	UV-Strahler, Röntgenröhren, Laser
11	Ultraschall	Ultraschallreinigung
12	Adiabatische Kompression	Verdichter, Stoßwellen in Leitungen
13	Chemische Reaktionen	Exotherme Vorgänge, Pyrophore

Literatur

- 1 IEC/TS 60079-32-1, Explosive atmospheres – Part 32-1: Electrostatic hazards, guidance, Ausgabedatum: 2013-08, Abschnitt C 6, Minimum Ignition Energies.
- 2 EN 60079-1 2015; Explosionsgefährdete Bereiche – Teil 1: Geräteschutz durch druckfeste Kapselung „d“.
- 3 TRGS 509 Lagern von flüssigen und festen Gefahrstoffen in ortsfesten Behältern sowie Füll- und Entleerstellen für ortsbewegliche Behälter.
- 4 Verordnung brennbare Flüssigkeiten (VbF), 2003 aufgehoben.
- 5 GESTIS-Stoffenmanager[®], Gefahrstoffinformationssystem des Institut für Arbeitsschutz (IFA) der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung e. V. (www.dguv.de, Stand November 2018).
- 6 BetrSichV, Betriebssicherheitsverordnung v. 3.2.2015 (BGBI I S49 zul. geä. durch Art.5, Abs.7 der VO v. 18.10.2017).
- 7 Nabert und Schön (1970). *Sicherheitstechnische Kennzahlen brennbarer Gase und Dämpfe*, 2. Aufl., Braunschweig: Deutscher Eichverlag, Nachdruck.
- 8 DIN EN 60079-0:2011 mod + Cor. 2012 + Cor. (2013). Allgemeinen Anforderungen an die Konstruktion, Prüfung und Kennzeichnung von elektrischen Geräten und Ex-Bauteilen.

- 9 TRBS 2153 (2009). Vermeidung von Zündgefahren infolge elektrostatischer Aufladungen (2016 ersetzt).
- 10 DGUV Information 213-060, TRGS 727, Vermeidung von Zündgefahren infolge elektrostatischer Aufladung, 2016.
- 11 DGMK-Forschungsbericht 508; Vermeidung der Entzündung von Ottokraftstoff/Luft-Gemischen beim Betanken von Kraftfahrzeugen, Hamburg 1996.
- 12 DGUV-Regel 113; 2016: Explosionsschutz-Regeln (früher BGR 104).
- 13 DIN EN 60079-10-1:2016-10; VDE 0165-101:2016-10, Explosionsgefährdete Bereiche – Teil 10-1: Einteilung der Bereiche – Gasexplosionsgefährdete Bereiche (IEC 60079-10-1:2015 + COR1:2015); Deutsche Fassung EN 60079-10-1:2015.
- 14 DIN EN 60079-10-2:2015-10; VDE 0165-102:2015-10, Explosionsgefährdete Bereiche – Teil 10-2: Einteilung der Bereiche – Staubexplosionsgefährdete Bereiche (IEC 60079-10-2:2015); Deutsche Fassung EN 60079-10-2:2015.
- 15 ATEX – RICHTLINIE 2014/34/EU DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES v. 26.02. 2014 zur Harmonisierung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten für Geräte und Schutzsysteme zur bestimmungsgemäßen Verwendung in explosionsgefährdeten Bereichen (Neufassung).
- 16 11. ProdSV – Verordnung zum Produktsicherheitsgesetz (Explosionsschutzprodukteverordnung v. 06.01.2016).
- 17 Bussenius. S. (1996). *Wissenschaftliche Grundlagen des Brand- und Explosionsschutzes*. Berlin: Verlag W. Kohlhammer.
- 18 REMBE® Q-Rohr, Produktinformation, Flammenlose Druckentlastung von Staub und Gasexplosionen, REMBE® GmbH Safety + Control, 59929 Brilon, www.rembe.de.

PowerPoint

- [☐ T1] Brand- und Explosionsgefahren
- [☐ T6] Die Bedeutung von Gefahrenzonen und Gerätekategorien
- [☐ P7] Hybridgemische

Bild-Nachweis

- [B27] REMBE® GmbH Safety + Control, 59929 Brilon

