

Explosionen

Gefahren und Schutzmassnahmen

Experimentalvortrag

In dieser Broschüre finden Sie die Beschreibung des von der Suva entwickelten Experimentalvortrags «Explosionen – Gefahren und Schutzmassnahmen». Ausgehend von ein paar wenigen Experimenten hat insbesondere Felix Scheller (Bereich Chemie) den Vortrag in vielen Jahren immer weiter ausgebaut, bis zur heutigen grossen Zahl spektakulärer Experimente. Die praxisbezogene Darstellung hat den Vortrag zu einer beliebten Einführung ins Thema Explosionsschutz gemacht.

Explosionsschutz bedeutet, mit gezielten Massnahmen Explosionen zu verhindern oder deren Auswirkungen so zu begrenzen, dass keine Menschen verletzt werden und die Schäden an Anlagen und Gebäuden möglichst gering ausfallen. Damit die Massnahmen richtig getroffen werden, müssen die Eigenschaften der Stoffe und die chemischen und physikalischen Vorgänge, die zur Explosion führen, zumindest in ihren Grundzügen bekannt sein.

Ziel des Experimentalvortrags und der vorliegenden Broschüre ist es, den Verantwortlichen in den Betrieben, Sicherheitsfachkräften, Arbeitnehmern und Arbeitnehmerinnen diese Kenntnisse auf einfache und eindrückliche Weise zu vermitteln.

Suva

Arbeitssicherheit
Postfach, 6002 Luzern
www.suva.ch

Auskünfte

Tel. 041 419 58 51

Bestellungen

www.suva.ch/waswo
Fax 041 419 59 17
Tel. 041 419 58 51

Titel

Explosionen – Gefahren und Schutzmassnahmen
Experimentalvortrag

Verfasser

Felix Scheller, Roland J. Ott, Jakob Utzinger,
Suva, Bereich Chemie, Luzern

Abdruck – ausser für kommerzielle Nutzung – mit
Quellenangabe gestattet.

Erstausgabe: April 2002

Überarbeitete Ausgabe: Februar 2014

Bestellnummer

44071.d (nur als PDF-Datei erhältlich)

Das Modell Suva

Die vier Grundpfeiler der Suva

- Die Suva ist mehr als eine Versicherung; sie vereint Prävention, Versicherung und Rehabilitation.
- Die Suva wird von den Sozialpartnern geführt. Die ausgewogene Zusammensetzung im Verwaltungsrat aus Arbeitgeber-, Arbeitnehmer- und Bundesvertretern ermöglicht breit abgestützte, tragfähige Lösungen.
- Gewinne gibt die Suva in Form von tieferen Prämien an die Versicherten zurück.
- Die Suva ist selbsttragend; sie erhält keine öffentlichen Gelder.

| | | |
|-----------|-----------------------------------------------------------------------------|----|
| 1 | Explosionsarten | 4 |
| 1.1 | Physikalische Explosion | 4 |
| 1.2 | Chemische Explosion | 4 |
| 1.3 | BLEVE | 5 |
| 2 | Dampfdruck | 6 |
| 3 | Beeinflussen von Brennstoff-Luft-Gemischen (Feuer löschen) | 7 |
| 4 | Explosionsfähige Atmosphäre von Gasen und Dämpfen ... | 10 |
| 4.1 | Explosionsfähige Atmosphäre in Rohrleitungen | 11 |
| 4.2 | Offene und geschlossene Systeme | 12 |
| 4.3 | Explosionsgrenzen | 13 |
| 4.4 | Flammpunkt | 15 |
| 5 | Brennbare Flüssigkeiten mit hohem Flammpunkt | 17 |
| 5.1 | Erwärmung über den Flammpunkt | 17 |
| 5.2 | Oberflächenvergrößerung und Dochtwirkung | 17 |
| 5.3 | Nebel von brennbaren Flüssigkeiten | 18 |
| 6 | Brennbare Stäube | 19 |
| 7 | Gefährliche brennbare Stoffe – Übersicht | 21 |
| 8 | Brennbare Stoffe in Kontakt mit anderen Stoffen | 22 |
| 8.1 | Inkompatible Stoffe | 22 |
| 8.2 | Vermischen mit leichtbrennbaren Flüssigkeiten | 23 |
| 9 | Fassexplosionen | 24 |
| 10 | Zündquellen | 26 |
| 10.1 | Flammen | 26 |
| 10.2 | Heisse Oberflächen | 26 |
| 10.3 | Statische Elektrizität | 27 |
| 10.4 | Elektrische Betriebsmittel | 28 |
| 10.5 | Chemische Reaktionen | 28 |
| 11 | Relative Dichte | 29 |
| 12 | Explosionsschutzmassnahmen | 31 |
| 12.1 | Vorbeugende Massnahmen | 31 |
| 12.2 | Konstruktive Massnahmen | 32 |
| 12.3 | Organisatorische Massnahmen | 34 |
| 13 | Bildnachweis | 35 |

1 Explosionsarten

Aus der Sicht der Arbeitssicherheit werden zwei Arten von Explosionen unterschieden:

- physikalische Explosion
- chemische Explosion

Die beiden ersten Experimente verdeutlichen den Unterschied:

1.1 Physikalische Explosion

★ Experiment «Platzen eines Behälters»

Wird einem geschlossenen Behälter (z. B. Dampfkessel) Energie, z. B. durch Erwärmen, zugeführt, so erfolgt ein Druckanstieg. Steigt der Druck im Kessel so stark an, dass der **Konstruktionsdruck überschritten** wird, ist das Zerplatzen des Behälters unter den bekannten spektakulären Erscheinungen (z. B. Zerknallen von Anlagen, Geräten und Gebäudeteilen) die konsequente Folge.

Weil es sich dabei um einen physikalischen Vorgang handelt, spricht man von einer «**physikalischen Explosion**».

1.2 Chemische Explosion

★ Experiment «Explosion eines Behälters»

Bei der «**chemischen Explosion**» wird der Druckanstieg durch die frei werdende Energie einer chemischen Reaktion verursacht, unter Beteiligung der Reaktionspartner Brennstoff und Sauerstoff (Bild 1). Eine Explosion in diesem Sinne ist von einer **Feuererscheinung** begleitet, sie stellt somit einen Spezialfall einer Verbrennung dar.

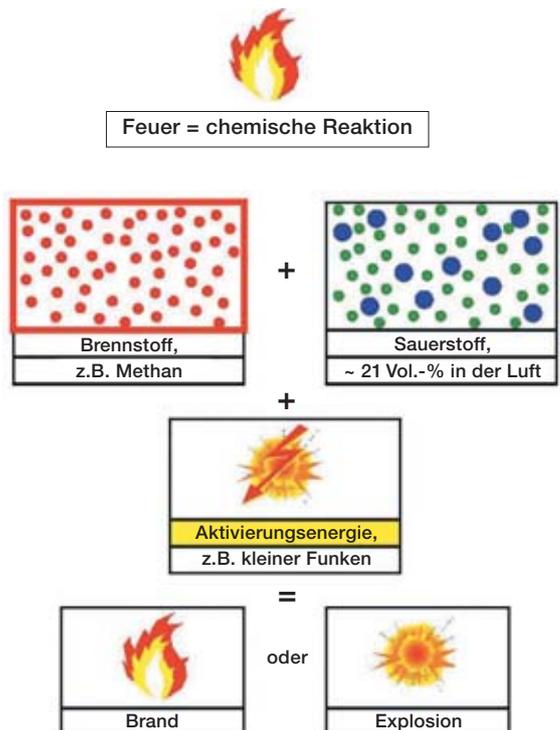


Bild 1: Chemische Explosion.

Diese Art von Explosion lässt sich wie folgt definieren:



Eine Explosion ist eine sehr schnell ablaufende chemische Reaktion eines brennbaren Stoffes, wobei grosse Energiemengen freigesetzt werden.

1.3 BLEVE

Eine besonders gefährliche Art einer Explosion stellt der so genannte **BLEVE** (**B**oiling **L**iquid **E**xpanding **V**apour **E**xplosion) dar. Dieser muss im Hinblick auf die Lagerung von unter Druck verflüssigten brennbaren Gasen in Wohn- und Industriegebieten in die sicherheitstechnischen Überlegungen miteinbezogen werden. Das folgende Experiment veranschaulicht, was gemeint ist:

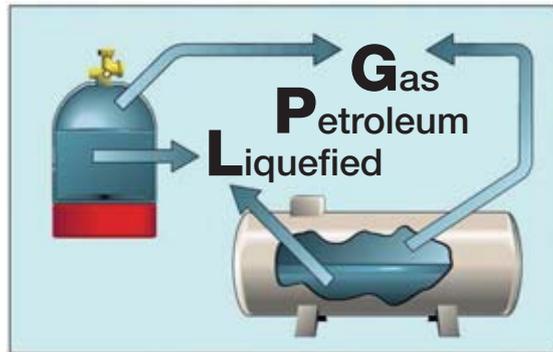


Bild 2: Zweiphasen-Zustandsform von Flüssiggas (LPG: z. B. Butan) [4].

❖ Experiment «Platzen und Explosion eines Behälters»

In einem Lagerbehälter mit Flüssiggas (LPG, Propan, Butan) befindet sich ein Teil des Gases in flüssigem, ein Teil in gasförmigem Zustand (Zweiphasen-Zustandsform von Flüssiggas, Bild 2). Steht ein solcher Behälter unter thermischem Einfluss, z. B. durch ein Umgebungsfeuer, so wird entsprechend der Temperaturerhöhung der Druck im Behälter steigen. Die Dampfdichte wird damit grösser, während die Dichte in der Flüssigphase abnimmt, da sich die Flüssigkeit mit steigender Temperatur ausdehnt. Bei weiterer Temperaturerhöhung wird der Punkt erreicht (= kritische Temperatur), bei der die beiden Dichten gleich gross sind. **Dies führt dazu, dass sich das Volumen massiv ausdehnt und damit der Berstdruck des Druckbehälters um ein Vielfaches überschritten wird.**

Durch das Bersten des Tanks können Bruchstücke hunderte von Metern weit fliegen. Das schlagartig austretende Gas entzündet sich, und es bildet sich ein riesiger Feuerball, der eine solche Hitze entwickeln kann (= Wärmestrahlung), dass Personen in grosser Entfernung noch schwere Verbrennungen erleiden.

Explosionsgefahr besteht, wenn in einem Betrieb brennbare Gase, Flüssigkeiten oder Stäube hergestellt, verarbeitet oder gelagert werden und dabei Gase, Dämpfe, Nebel (Flüssigkeitströpfchen) oder Stäube auftreten, die zusammen mit Luft ein explosionsfähiges Gemisch bilden können (Bild 3).

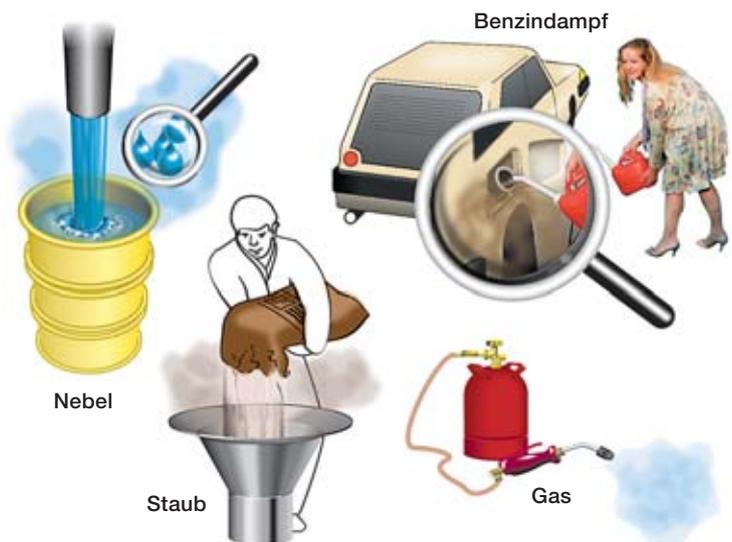


Bild 3: Beispiele für das Freisetzen von brennbaren Gasen, Dämpfen, Nebeln und Stäuben [2].

2 Dampfdruck

★ Experiment «Sichtbarmachen des Dampfdruckes»

Wird Flüssiggas (Propan, Butan) in einem geschlossenen System erhitzt, so steigt der Druck an (Dampfdruck). Dieser Druckanstieg erfolgt nicht linear, sondern exponentiell (Bild 4).

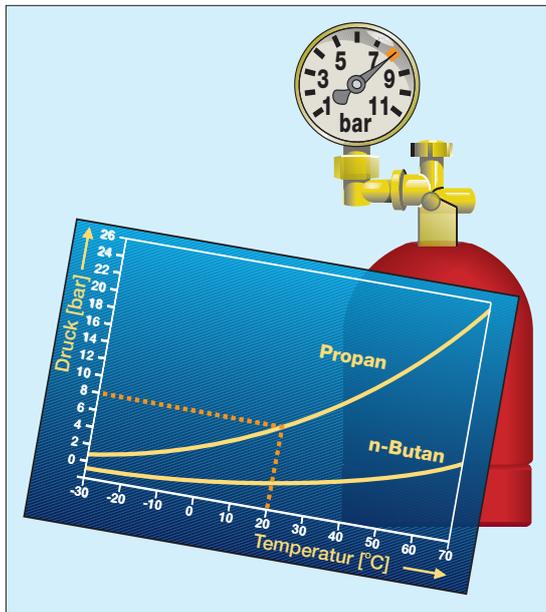


Bild 4: Dampfdruckkurven von Propan und Butan [4].



Vollständig gefüllte Behälter können schon bei geringer Temperaturerhöhung platzen.

★ Experiment «Gasverflüssigung»

Wird in einem Gefäß gasförmiges Butan mit einem Kolben zusammengepresst, verflüssigt sich das Gas bei einem bestimmten Druck und nimmt dadurch ein **wesentlich kleineres Volumen** ein. Wird die Flüssigkeit vom Druck entlastet, verwandelt sich die Flüssigkeit wieder in die Gasphase.

3 Beeinflussen von Brennstoff-Luft-Gemischen (Feuer löschen)

❖ Experiment «Löschen eines Brandes durch Abdecken»

Durch das **Entziehen der Verbrennungsluft** kann ein Feuer gelöscht werden. Diese Methode findet häufig Anwendung, indem man das Feuer abdeckt, z. B.

- mit Decken (wenn die Kleider in Brand geraten sind und das Feuer durch Abdecken und gleichzeitiges Wälzen am Boden erstickt wird),
- durch mechanisches Abdecken (z. B. mit Deckeln bei einem Fritteusenbrand) oder
- mit Feuerlöschschaum bzw. -pulver.

Am Beispiel des Automotors kann das Zusammenspiel von Brennstoff und Luft veranschaulicht werden:

Das Benzin wird im Vergaser verdampft, mit dem Luftsauerstoff in einer bestimmten Konzentration vermischt und dem Motor zugeführt, wo durch Entzündung mittels Zündkerze die notwendige Aktivierungsenergie (= Zündenergie) freigesetzt wird und die Explosion erfolgt. Dabei wird neben den Abgasen, die zur Hauptsache aus Kohlendioxid (CO_2), dem äusserst giftigen Kohlenmonoxid (CO), Kohlenstoff (= Russ) und Wasser bestehen, Energie frei, die zum Antrieb des Autos genutzt wird.

Im Vergaser muss, damit eine optimale Verbrennung gewährleistet ist, ein ganz bestimmtes Benzindampf-Luft-Gemisch vorhanden sein (**explosionsfähige Atmosphäre**). Ist der Benzinanteil im Gemisch zu klein, kann keine Explosion erfolgen, ebenfalls nicht, wenn er zu gross ist oder – umgekehrt gesagt –, wenn der Sauerstoffanteil im Gemisch zu klein ist; in einem solchen Fall sagt man, der Motor sei «versoffen».

Für das Zustandekommen eines Brandes oder einer Explosion müssen gleichzeitig und am gleichen Ort folgende Voraussetzungen erfüllt sein: Luft bzw. Sauerstoff und Brennstoff als Reaktionskomponenten in einem explosionsfähigen Gemisch und eine Zündquelle mit ausreichender Energie (Bild 5).

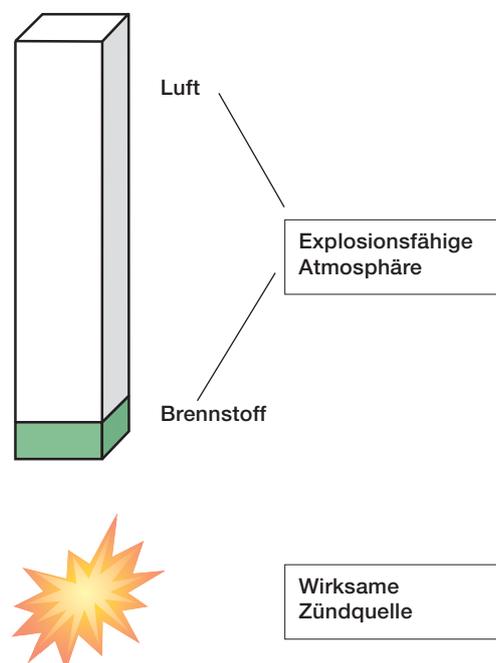


Bild 5: Voraussetzungen für das Zustandekommen einer Explosion.

Beim vorbeugenden Explosionsschutz müssen immer Massnahmen getroffen werden, die das Entstehen eines explosionsfähigen Gemisches verhindern bzw. einschränken. Gleichzeitig sind, in der Regel flankierend dazu, wirksame Zündquellen zu vermeiden.

❖ Experiment «Löschen eines Alkoholbrandes mit Wasser»

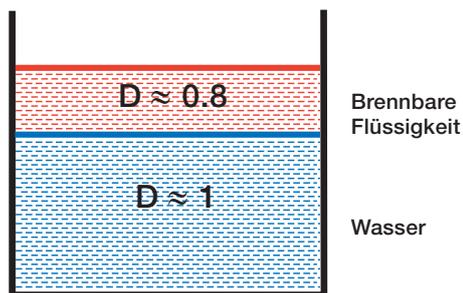
In Brand geratene, **wasserlösliche brennbare Flüssigkeiten** wie Alkohol (Ethanol) können durch Zugabe von Wasser verdünnt und auf diese Weise «gelöscht» werden, weil der Brennstoff nicht mehr in ausreichender Menge aus dem Wasser-Lösemittel-Gemisch verdampfen kann.

❖ Experiment «<Löschen> eines Benzinbrandes mit Wasser»

Die Methode des Verdünnens mit Wasser darf aber keinesfalls bei **wasserunlöslichen brennbaren Flüssigkeiten** (wie Benzin, Toluol, Nitroverdünner) angewendet werden, da diese, aufgrund ihrer Dichte, in der Regel leichter als Wasser sind und deshalb auf dem Wasser schwimmen (Bild 6). Durch die Zugabe von Wasser muss mit einer Brandausbreitung (Oberflächenvergrößerung) anstelle eines Löscheffektes gerechnet werden.

Brennbare Flüssigkeiten

In der Regel ♦ schwerlöslich in Wasser
 ♦ leichter als Wasser



D: Dichte

Bild 6: Schwerlösliche brennbare Flüssigkeit auf Wasser.



Wenn mit brennbaren Stoffen umgegangen wird bzw. solche gelagert werden, ist es wichtig, dass geeignete Lösch- und Kühlmittel bereitstehen.

❖ Experiment «<Löschen> eines Ölbrandes mit Wasser»

Wenn versucht wird, einen **Ölbrand** mit Wasser zu löschen, resultiert ebenfalls eine «Verschlimmbesserung». In diesem Fall wäre z. B. das Abdecken des Brandherdes richtig.

❖ Experiment «Löschen eines Brandes durch Unterbrechen der Brennstoffzufuhr»

Das Entstehen eines explosionsfähigen Benzindampf-Luft-Gemisches kann auch verhindert bzw. das Feuer gelöscht werden, indem die Brennstoffzufuhr unterbrochen wird. Bei brennbaren Flüssigkeiten kann dies z. B. durch Abstellen der entsprechenden Fördereinrichtung relativ einfach bewerkstelligt werden.

In der Praxis muss dies beim Umfüllen von Lösemitteln berücksichtigt werden. Je höher die Pumpenleistung ist, desto mehr Dämpfe werden ausgestossen und desto grösser wird der explosionsgefährdete Bereich.

❖ Experiment «Löschen» eines Brandes an einer Gasflasche»

Bei brennbaren Gasen besteht die **Gefahr einer Rückzündung**. Das heisst: Nach dem Löschen eines Flaschenbrandes besteht die Gefahr, dass sich das weiterhin ausströmende Gas an einer weit entfernten Zündquelle erneut entzündet und die Flamme bis zur Austrittsstelle zurückschlägt. Ein Brand an einer Flüssiggasflasche darf **deshalb nur gelöscht werden**, um das Ausbreiten des Brandes zu verhindern und wenn die Leckstelle abgedichtet werden kann. Wird das Ventil geschlossen und damit die Gaszufuhr unterbrochen, erlischt das Feuer sofort. Ist dies nicht möglich, trägt man die Gasflaschen vorsichtig ins Freie, wo der Brand keinen Schaden anrichten kann.

★ Experiment «Implosion eines Behälters»

Beispiel aus der Praxis: Anlässlich von Änderungsarbeiten an einem 10 000 m³ fassenden Stehtank geriet (durch eine falsche Arbeitsweise) der Ölschlamm im Behälter in Brand. Die Tankrevisoren löschten daraufhin den Brand, indem sie durch Schliessen der Einstiegsöffnungen das Feuer erstickten (**= Entziehen der notwendigen Verbrennungsluft**). Dabei beachtetten sie jedoch nicht, dass sich die Luft im Tank durch die beim Brand entstandene Wärme bereits ausgedehnt hatte. Nach dem Schliessen der Einstiegsöffnungen sowie dem Erlöschen des Feuers und der damit verbundenen Abkühlung zog sich die Luft wieder zusammen. Da nicht genügend Luft nachströmen konnte, entstand ein Unterdruck, was zur Folge hatte, dass der 20 m hohe Tank zerstört wurde.

Die Tatsache, dass für einen Brand bzw. für eine Explosion ein bestimmtes Brennstoff-Luft-Gemisch vorliegen muss, macht man sich im Explosionsschutz zunutze:

★ Experiment «Vermindern des Sauerstoffgehaltes, Inertisierung»

Man beeinflusst ein explosionsfähiges Gemisch oder einen Brand durch **Zugabe eines reaktionsträgen Gases** wie Stickstoff und Kohlendioxid oder durch Zugabe eines inerten Staubes wie Ammoniumphosphat so, dass der Sauerstoffanteil in der Luft kleiner wird (Phlegmatisierung bis Inertisierung). Wenn der Sauerstoffanteil von 21 Vol.-% auf etwa 8 Vol.-% im Brennstoff-Luft-Gemisch fällt, kann die chemische Reaktion (Verbrennung) in der Regel nicht mehr stattfinden.

★ Experiment «Erhöhen des Sauerstoffgehaltes, Verbrennung in sauerstoffreicher Atmosphäre»

Wird der Sauerstoffanteil durch **Zugabe von reinem Sauerstoff** erhöht, so vervielfacht sich die Verbrennungsgeschwindigkeit. Schon bei 24 Vol.-% Sauerstoff wird die Verbrennungsgeschwindigkeit verdoppelt und bei 40 Vol.-% bereits verzehnfacht. Glimmende Materialien beginnen bei einem Sauerstoffgehalt der Luft von 28 Vol.-% zu brennen; Textilien, Öle, Fette usw. brennen bei einem Luftsauerstoffgehalt von 25 bis 30 Vol.-% schon äusserst lebhaft. In reinem Sauerstoff verbrennt glühender Stahl wie Holz. Kleidungsstücke brennen in Luft, die mit Sauerstoff angereichert ist, sofort lichterloh, wenn ein kleiner Funke dazu kommt.



Jede «Luftverbesserung» mit Sauerstoff ist grundsätzlich verboten.

★ Experiment «Abbrennen einer Zündschnur in Wasser»

Explosivstoffe bzw. **explosionsgefährliche Stoffe** (u.a. Sauerstoffträger) wie Sprengstoffe (z. B. Trinitrotoluol oder Glycerintrinitrat), Munition oder pyrotechnische Gegenstände können in Abwesenheit von Luftsauerstoff durch eine Initialzündung (= Aktivierungsenergie) zur Reaktion gebracht werden. Sie brauchen keinen Luftsauerstoff, weil der Sauerstoff im Produkt selber chemisch gebunden ist.

Dies zeigt sich beim Abbrennen einer Zündschnur in Wasser. Die Zündschnur brennt, obwohl kein Zutritt von Luftsauerstoff mehr möglich ist.

4 Explosionsfähige Atmosphäre von Gasen und Dämpfen

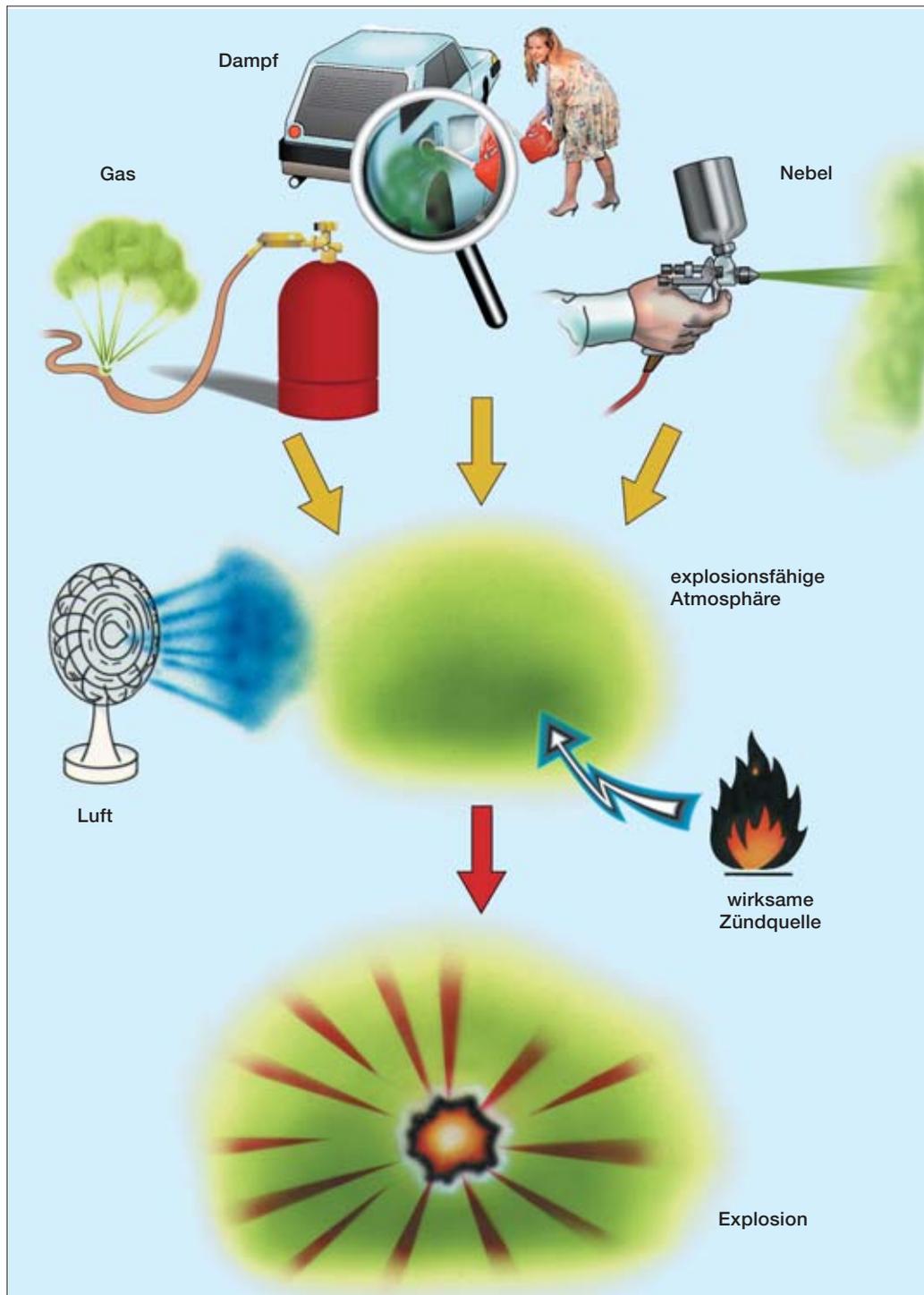


Bild 7: Voraussetzungen für das Zustandekommen von Explosionen [1].



Wenn eine dieser Voraussetzungen sicher vermieden wird, kann die Explosion verhindert werden.

4.1 Explosionsfähige Atmosphäre in Rohrleitungen



Eine explosionsfähige Atmosphäre ist ein Gemisch aus Luft und brennbaren Gasen, Dämpfen, Nebeln oder Stäuben, in dem sich der Verbrennungsvorgang nach erfolgter Zündung auf das gesamte unverbrannte Gemisch überträgt.

★ Experiment «Entzünden einer explosionsfähigen Atmosphäre in einer beidseitig offenen Rohrleitung»

Wird ein vorhandenes explosionsfähiges Gas-Luft-Gemisch in einer rohrähnlichen Strecke entzündet (z. B. Klimakanal, pneumatische Förderleitung, Korridor, Stollen, Kanalisation), so bewegt sich die **Flammenfront mit niedriger Geschwindigkeit** durch die Strecke, sofern kein allzu grosser Widerstand wirkt (relativ kurze Strecke, beide Seiten offen).

★ Experiment «Rohrleitung einseitig verschlossen»

Aufgrund der Erwärmung durch die Verbrennung nehmen die Reaktionsprodukte ein grösseres Volumen ein als die Ausgangsprodukte. Da im einseitig geschlossenen Rohr nach der Entzündung des explosionsfähigen Gas-Luft-Gemisches die Verbrennungsprodukte nicht mehr frei abströmen können, führt dies zu einer **Druckerhöhung im Rohr** und damit zu einer **höheren Reaktionsgeschwindigkeit**. Würde man das Rohr an beiden Enden verschliessen, wäre eine Explosion mit Splitterwirkung unvermeidlich, da das Rohr dem Explosionsüberdruck nicht standhalten würde.

Bei Entzündung am geschlossenen Rohrende werden zudem durch die Verbrennungsgase grosse Mengen an unverbranntem Gasgemisch ausgestossen, die dann durch die nachfolgende Flammenfront ausserhalb des Rohres in Form eines Feuerstosses oder Feuerballs entzündet werden (Bild 8).



Bild 8: Sekundärexplosion ausserhalb des Behälters [5].

★ Experiment «Abgeblendete Rohrleitung»

Wird eine explosionsfähige Atmosphäre in einer abgeblendeten, d.h. einseitig verschlossenen Rohrleitung entzündet, so läuft die Verbrennungsreaktion zwar an, doch die Flamme erlischt bald. Denn im abgeblendeten System mischt sich das Reaktionsprodukt Kohlendioxid vor der Flamme mit der explosionsfähigen Atmosphäre (Selbstinertisierung). Das **Feuer erstickt** mangels Sauerstoff.



Abgehängte Rohrleitungen (z. B. bei der Instandhaltung) sind immer abzublinden.

✧ Experiment «Rohrleitung mit Querschnittsverengung»

Entzündet man ein explosionsfähiges Gas-Luft-Gemisch in einem Rohr, das durch seine grosse Länge oder durch Verengungen **Widerstand** bietet, so stellt man eine geradezu dramatische Veränderung fest. Die Verbrennungsprodukte können nicht mehr frei abströmen und stossen die unverbrannte Gasmischung (und damit auch die Flammenfront) vor sich her, wodurch die Strömungsgeschwindigkeit höher wird; die laminare Strömung geht in eine turbulente über. Die Turbulenz **erhöht die Verbrennungsgeschwindigkeit**, die in einer steilen Kurve ansteigt, bis die so genannte Detonationsgeschwindigkeit erreicht ist.

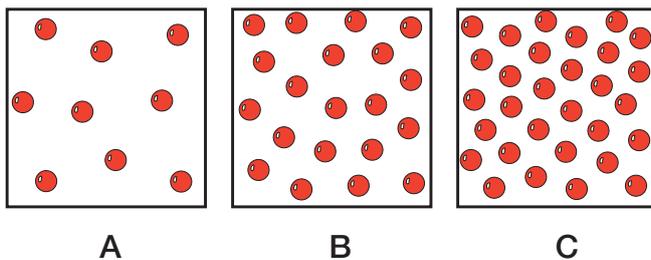


Bild 9: Bereiche mit unterschiedlichen Konzentrationen des Benzindampf-Luft-Gemisches.

- A: zu wenig Dämpfe: keine Explosion.
- B: explosionsfähige Atmosphäre: Explosion.
- C: zu viel Dämpfe: keine Explosion.

4.2 Offene und geschlossene Systeme

✧ Experimente «Zündversuche in offenen Gefässen»

Bei Raumtemperatur können die Dämpfe von Benzin sowie von Alkohol im offenen System entzündet werden, es entsteht ein **Brand**. Terpentinersatz oder Heizöl können hingegen nicht entzündet werden, obwohl es sich dabei ganz klar um Brennstoffe handelt (siehe Abschnitt 4.4).

✧ Experimente «Zündversuche in geschlossenen Gefässen»

Im Falle von Alkohol erfolgt im geschlossenen System unter Normalbedingungen nach der Entzündung eine **Explosion**. Beim gleichen Versuch mit viel Benzin kommt es im geschlossenen System – trotz wirksamer Zündquelle – zu keiner Explosion.

Dieses Phänomen lässt sich dadurch erklären, dass die Konzentration des Benzindampf-Luft-Gemisches im geschlossenen Behälter, bei Raumtemperatur, aufgrund des Dampfdruckes zu gross ist, als dass es zu einer Entzündung des Gemisches kommen könnte (Bild 9 C).

Dies zeigt, dass ein Dampf-Luft-Gemisch nur in einem ganz bestimmten Konzentrationsbereich explosionsfähig ist. Wir sprechen vom so genannten Explosionsbereich.

4.3 Explosionsgrenzen

★ Experiment «Konzentrationsgefälle beim Verdampfen einer Flüssigkeit in einem Gefäss»

Eine Flüssigkeit in einem Gefäss verdampft langsam. Mit der Zeit steigt die Dampfkonzentration, wobei sie am Anfang unten im Gefäss hoch ist und oben niedrig. Je höher jedoch der **Dampfdruck** einer Flüssigkeit ist, desto schneller stellt sich im geschlossenen System eine homogene Verteilung ein.

★ Experiment «Bestimmung des Explosionsbereichs»

In einem Gefäss ist die Dampfkonzentration knapp über dem Flüssigkeitsspiegel sehr hoch, im Fall von Benzin so hoch, dass keine Explosion stattfinden kann, wenn eine Zündquelle einwirkt: Das Gemisch ist **zu fett**. Umgekehrt sind im obersten Teil des Gefässes so wenige Benzinmoleküle vorhanden (d.h. die Dampfkonzentration so niedrig), dass ebenfalls keine Reaktion erfolgen kann: Das Gemisch ist **zu mager** (Bild 10). Irgendwo dazwischen muss ein Konzentrationsbereich liegen, in dem das Dampf-Luft-Gemisch explosionsfähig ist. Dieser Bereich wird durch die **untere und obere Explosionsgrenze** definiert und als Explosionsbereich bezeichnet.

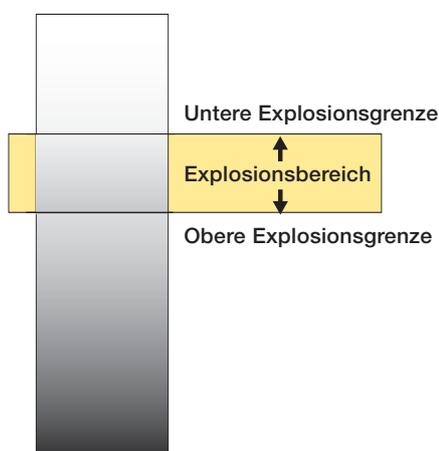
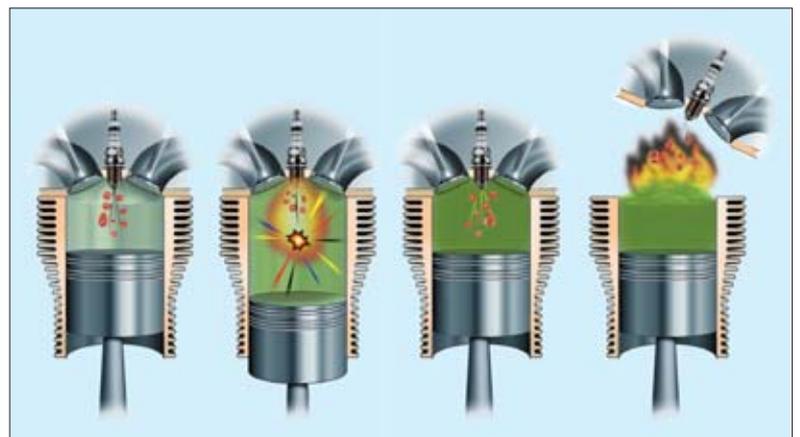


Bild 10: Explosionsbereich.

★ Experiment «Obere Explosionsgrenze im geschlossenen System»

Wird eine wirksame elektrische Zündquelle in einem mit Methan gefüllten Ballon (= **geschlossenes System**) betätigt, erfolgt keine Entzündung. Wird eine etwa gleich grosse Menge Luft zugeführt, passiert immer noch nichts, da die Gas-Luft-Konzentration über der oberen Explosionsgrenze liegt. Erst bei einer weiteren Luftzugabe kommt es zur **Explosion**, d.h. wenn die Konzentration im Explosionsbereich liegt. Zur Veranschaulichung wird dieses Experiment anhand eines Zylinders eines Benzinmotors bildlich dargestellt (Bild 11).



Gemisch zu mager Gemisch explosionsfähig Gemisch zu fett (geschlossenes System) Gemisch zu fett (offenes System)

Bild 11: Explosionsgrenzen [1].

Die Explosionsgrenzen der gebräuchlichsten brennbaren Flüssigkeiten und Gase liegen in der gleichen Grössenordnung:

- Untere Explosionsgrenze: in der Regel um 1 Vol.-% = ca. 50 g/m³
- Obere Explosionsgrenze: sehr unterschiedlich; in der Praxis meist nicht relevant.

❖ Experiment «Obere Explosionsgrenze im offenen System»

In einem unten **offenen Behälter** befindet sich oben Methangas, in der Mitte das Gas-Luft-Gemisch und unten die Luft. Eine Zündschnur, die im Behälter hängt, wird oben entzündet. Die Zündschnur brennt im Erdgas ab, ohne dieses zu entzünden, da das Gemisch zu fett ist. Erst an der Grenzschicht zur Luft, d.h. bei der oberen Explosionsgrenze, kommt es zur Reaktion, zu einem **Brand**, da das System nicht verdämmt ist (Bild 11).

❖ Experiment «Volumenzunahme beim Verdampfen»

Verdampft eine gegebene Menge einer brennbaren Flüssigkeit bzw. eines unter Druck verflüssigten Gases, so benötigt der aus ihr entstehende Dampf bzw. die resultierende Gasphase ein Volumen, das bis zu 300-mal grösser ist als das ursprüngliche Volumen in der flüssigen Phase (Bild 12).



Bild 12: Volumenzunahme beim Verdampfen von Propan [4].

❖ Experiment «Einfluss der Verdämmung»

Je besser ein geschlossenes System verdämmt ist, desto grösser sind die Auswirkungen einer Explosion (Bild 13), es sei denn, die Behälter oder Apparaturen sind bezüglich Druckfestigkeit so ausgelegt, dass sie dem maximalen Explosionsüberdruck standhalten.

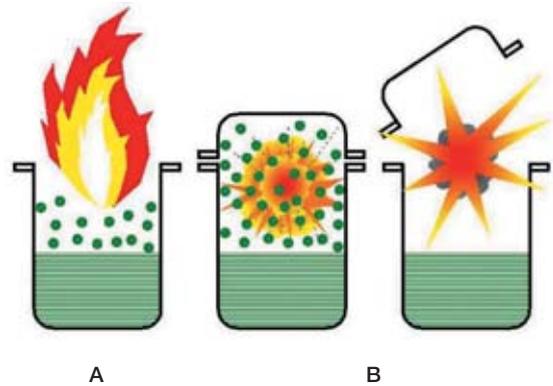


Bild 13: Einfluss der Verdämmung.

A: Offenes System, Brand.
B: Geschlossenes System, Explosion.

Auf der Dampfdruckkurve ist jeder Temperatur ein bestimmter Druck des Dampfes zugeordnet, bei der sich die Flüssigkeit und der Dampf im Gleichgewichtszustand befinden. Diesem Druck entspricht eine bestimmte Konzentration, die so genannte Sättigungskonzentration (Bild 14).

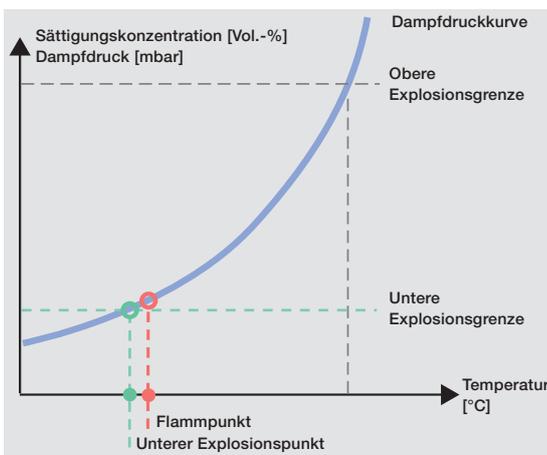


Bild 14: Explosionsgrenzen und Flammpunkt.

Die Temperaturen, die auf der Dampfdruckkurve den Konzentrationen der unteren und der oberen Explosionsgrenzen entsprechen, werden als unterer und oberer Explosionspunkt bezeichnet.

Der untere Explosionspunkt und der **Flammpunkt** charakterisieren beide die untere Explosionsgrenze. Der untere Explosionspunkt einer brennbaren Flüssigkeit stimmt nicht immer genau mit dem jeweiligen Flammpunkt überein, da beide Kenngrößen mit verschiedenen Messmethoden bestimmt werden.

Bild 15: Dampfkonzentration [g/m³] einiger gebräuchlicher brennbarer Flüssigkeiten bei Sättigung in Luft und 20 °C.

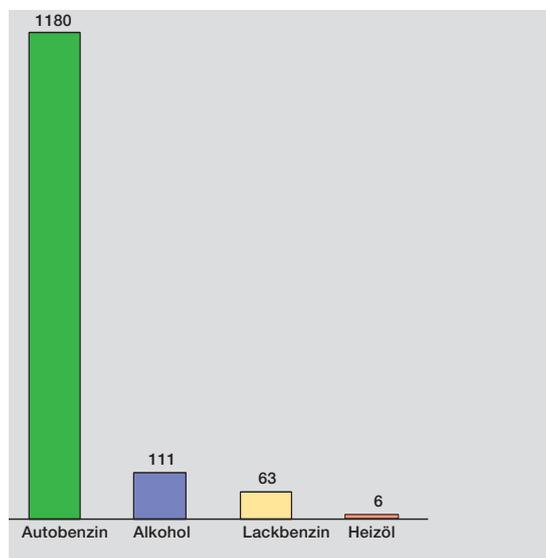
4.4 Flammpunkt

★ Experiment «Erwärmen einer brennbaren Flüssigkeit: Flammpunkt»

Erhitzt man eine brennbare Flüssigkeit, z. B. Heizöl, so wird es bei einer bestimmten Temperatur bei Vorhandensein einer wirksamen Zündquelle oberhalb des Flüssigkeitsspiegels zu einer Entzündung kommen. Diese Temperatur wird als Flammpunkt bezeichnet und ist im Explosionsschutz eine wichtige **sicherheitstechnische Kenngröße**. Unterhalb des Flammpunktes kommt es zu keiner Entzündung (zu wenig Dämpfe, d.h. das Gemisch ist zu mager, siehe Bild 17).

Der Flammpunkt ist die tiefste Temperatur, bei der eine Flüssigkeit genug Dampf entwickelt, um mit der umgebenden Luft ein Gemisch zu bilden, das sich beim Annähern einer Flamme kurzzeitig entzündet.

Nicht die Flüssigkeit brennt, sondern nur deren Dämpfe. Im Fall von Heizöl muss davon ausgegangen werden, dass es sich (wie im Experiment «Zündversuche in offenen Gefässen» beschrieben) nicht entzünden liess, weil zu wenig Dämpfe vorhanden waren (Bild 15).



Die sicherheitstechnische Kenngrösse «Flammpunkt» ist in der Praxis sehr nützlich für das Beurteilen der Brand- und Explosionsgefahr einer brennbaren Flüssigkeit.



In der Schweiz wird eine brennbare Flüssigkeit, deren Flammpunkt unter 30 °C liegt, als leichtbrennbar eingestuft (Bild 16).

Eine leichtbrennbare Flüssigkeit kann bei Raumtemperaturen, wie sie bei unseren klimatischen Bedingungen bestehen, so viele Dämpfe freisetzen, dass sich diese bei Kontakt mit einer wirksamen Zündquelle entzünden können.

Die Flammpunkte der reinen Flüssigkeiten sowie weitere sicherheitstechnisch relevante Kenngrössen wie Explosionsgrenzen oder relative Dichten können dem Merkblatt «Sicherheitstechnische Kenngrössen von Flüssigkeiten und Gasen» (Suva-Bestellnummer 1469) entnommen werden.



In Bereichen, in denen leichtbrennbare Flüssigkeiten gelagert werden oder mit ihnen umgegangen wird, müssen immer Explosionsschutzmassnahmen getroffen werden.

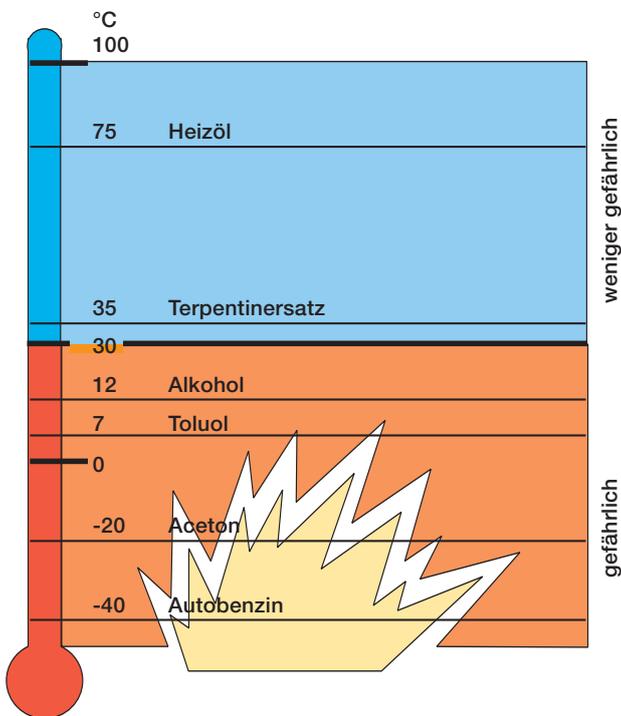


Bild 16: Flammpunkt verschiedener Flüssigkeiten [6].

5 Brennbare Flüssigkeiten mit hohem Flammpunkt

Die Grenze von 30 °C allein genügt nicht zur Beurteilung der Gefährlichkeit von brennbaren Flüssigkeiten. Auch bei Flüssigkeiten mit einem **Flammpunkt über 30 °C** müssen unter Umständen Explosionsschutzmassnahmen getroffen werden. Für die Beurteilung der Brand- und Explosionsgefahr solcher Flüssigkeiten sind folgende weitere Faktoren zu berücksichtigen:

5.1 Erwärmung über den Flammpunkt

So muss immer abgeklärt werden, ob beim Umgang mit der verwendeten brennbaren Flüssigkeit eine Erwärmung derselben über ihren Flammpunkt möglich ist (Bild 17).

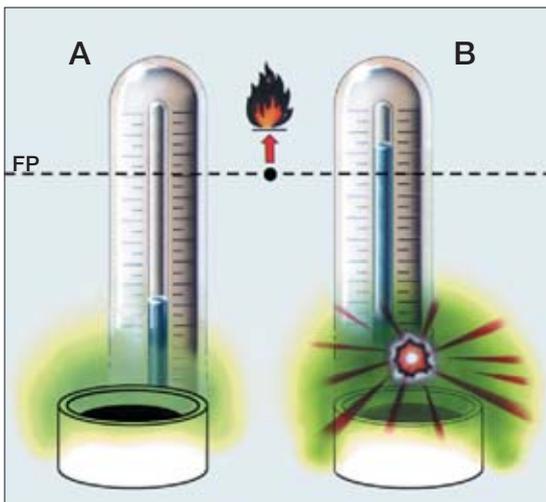


Bild 17: Bedeutung des Flammpunktes [1].

- A: Flammpunkt über der Arbeitstemperatur, zu wenig Dämpfe, keine Explosionsgefahr.
- B: Flammpunkt unter der Arbeitstemperatur, genügend Dämpfe, Explosionsgefahr.



Werden brennbare Flüssigkeiten über ihren Flammpunkt erwärmt, entwickeln sich genügend Dämpfe (Bild 17), die entzündet werden können. Es besteht Brand- bzw. Explosionsgefahr.

5.2 Oberflächenvergrößerung und Dochtwirkung

Brennbare Flüssigkeiten, die bei Normaltemperatur keine Explosionsgefahr darstellen wie **Öle**, können **auf Trägermaterialien** ihre Oberfläche so stark vergrössern, dass durch die Dochtwirkung so viele Dämpfe entstehen, dass sie leicht entzündet werden können (Bild 18). Dabei können die Trägermaterialien sogar unbrennbar sein.

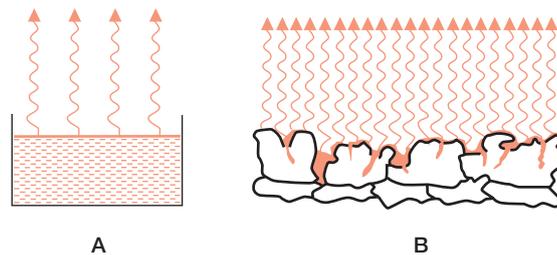


Bild 18: Dochtwirkung.

- A: Öl im offenen Gefäss: wenig Dämpfe.
- B: Öl auf Trägermaterial: genügend Dämpfe, Brand- und Explosionsgefahr.

Im klassischen Schalenbrenner wird das Heizöl z. B. mit einer Zündhilfe vorgeheizt, bis das Heizöl genügend Dämpfe entwickelt und diese sich entzünden.

☆ Experiment «Ölbindemittel als Trägermaterial»

Ausgelaufene oder verschüttete brennbare Flüssigkeiten mit einem Flammpunkt über 30 °C, die mit **schwer- oder unbrennbaren Ölbindemitteln** aufgenommen wurden, können sich beim Annähern einer wirksamen Zündquelle entzünden, wodurch sich unter Umständen ein grosser Flächenbrand ergeben kann.

☆ Experiment «Überkleider als Trägermaterial»

Werden brennbare **Öle oder Fette mit Textilien** (wie Baumwolle) in Kontakt gebracht, führt dies ebenfalls zur Oberflächenvergrösserung bzw. Dochtwirkung und zu den damit verbundenen Risiken.

In der Praxis ist dies von grösster Wichtigkeit, wenn fettige Putzlappen oder verschmutzte Überkleider mit einer wirksamen Zündquelle in Berührung kommen. Arbeitnehmer, die fettige Überkleider tragen (selbst wenn diese Fettschicht trocken erscheint), brennen nach Entzündung in einem solchen Fall wie eine Fackel.



Geeignet sind Arbeitskleider u.a. aus reiner Baumwolle. Fettige Arbeitskleidung muss rechtzeitig gewechselt werden.

☆ Experiment «Rohrleitungsisolation als Trägermaterial»

Wenn Öl, z. B. Wärmeträgeröl, auf schwer- oder **unbrennbares Wärmedämmmaterial** von heissen Rohrleitungen gelangt, kann eine Dochtwirkung entstehen. Dadurch entstehen genügend Dämpfe, die entzündet werden können.

5.3 Nebel von brennbaren Flüssigkeiten

Eine brennbare Flüssigkeit wird in Nebel umgewandelt, wenn sie versprüht wird. **Aufgrund der kleinen Partikelgrösse** bildet sich beim Einwirken einer Zündquelle mit ausreichender Energie eine explosionsfähige Atmosphäre, und zwar auch dann, wenn die Flüssigkeit bei einer Temperatur versprüht wird, die unter dem Flammpunkt liegt (Bild 19). Das heisst, auch Flüssigkeiten mit sehr hohem Flammpunkt können unter diesen Bedingungen entzündet werden, wenn eine wirksame Zündquelle einwirkt.

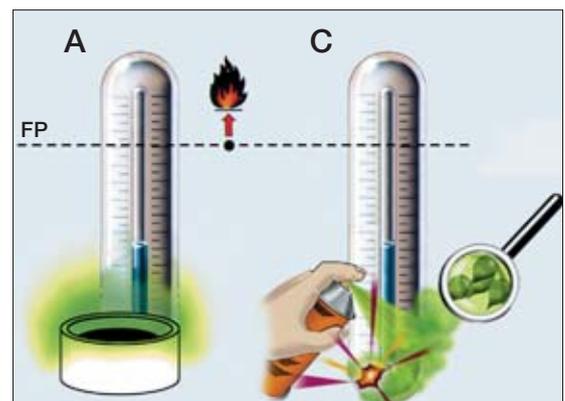


Bild 19: Bedeutung des Flammpunktes im Zusammenhang mit Nebeln [1].

- A: Flammpunkt über der Arbeitstemperatur, zu wenig Dämpfe, keine Explosionsgefahr.
- C: Flammpunkt über der Arbeitstemperatur, jedoch Versprühen: Aerosol (Nebel), Explosionsgefahr.

☆ Experiment «Ölnebel durch Versprühen»

Das Prinzip des Versprühens liegt z. B. dem modernen Heizölbrenner zugrunde, bei dem das Heizöl (hoher Flammpunkt) durch eine Düse in die Brennkammer gesprüht und von der Funkenstrecke der Elektroden entzündet wird.



Nebel brennbarer Flüssigkeiten können eine Brand- oder Explosionsgefahr auch unterhalb des Flammpunktes hervorrufen!

6 Brennbare Stäube

★ Experiment «Staubexplosion im Silo»

Aufgewirbelte brennbare Stäube (z. B. von Holz, Kohle, Getreide, Kunststoffen, aber auch von vielen Metallen, wenn sie in feiner Verteilung vorliegen) können mit Luft explosionsfähige Gemische bilden und verpuffen bzw. explodieren, wenn eine ausrei-

chend starke Zündquelle wirksam wird (Bild 20). Es entstehen die gefürchteten **Staubexplosionen**. Voraussetzung ist, dass der Staub in genügender Feinheit vorliegt.

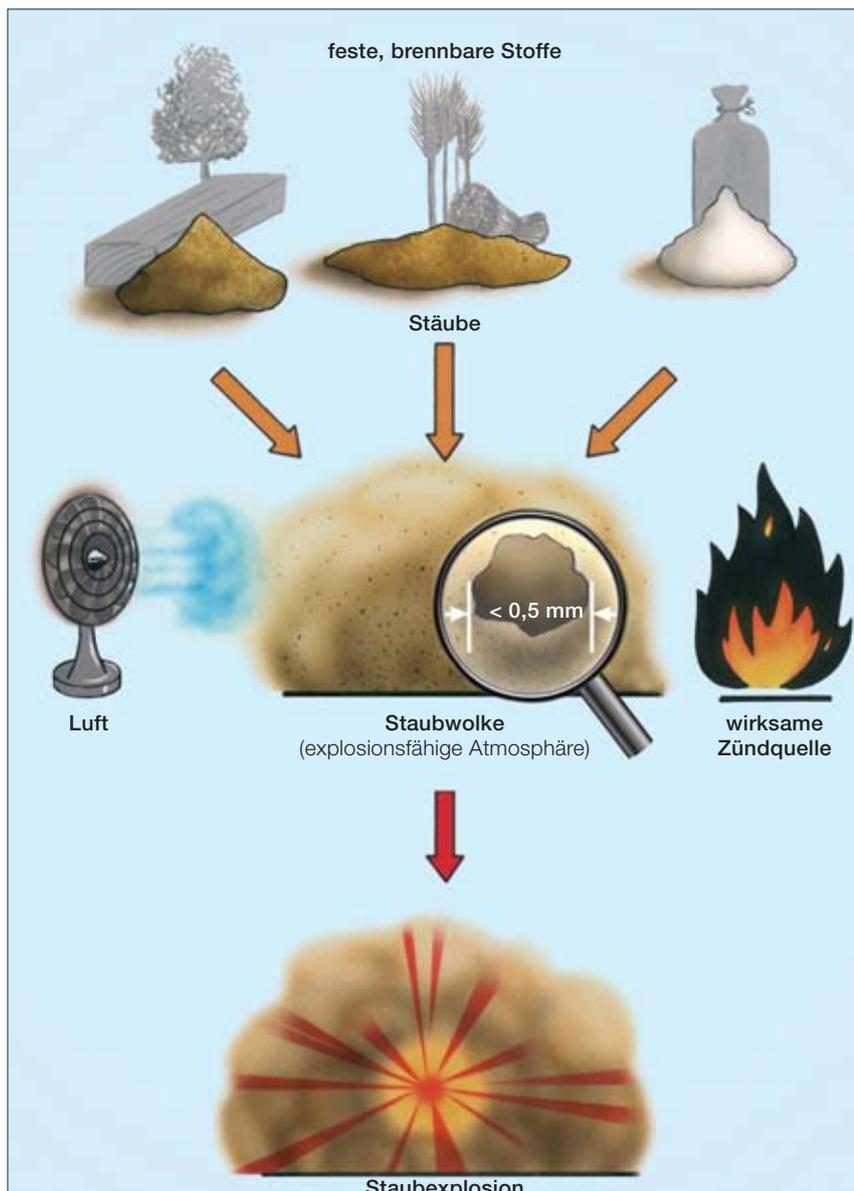


Bild 20: Voraussetzungen für das Zustandekommen von Staubexplosionen [3].



Kommt im Betrieb brennbarer Staub vor, kann Explosionsgefahr bestehen!

❖ **Experiment «Feinheit des brennbaren Feststoffes»**

Stahlwolle kann entzündet werden. Ob ein oxidierbarer Stoff entzündbar ist oder nicht, hängt auch von seiner Form ab, d.h. von der **Feinheit bzw. Korngrösse**. In lockerer Anordnung sind auch viele scheinbar nicht- oder schwerbrennbare Stoffe explosions- bzw. brandgefährlich.

❖ **Experiment «Aufwirbeln von abgelagertem Staub»**

Wird eine Staubschicht entzündet, entsteht ein Brand. Aufgewirbelter Staub in Form einer Staubwolke lässt sich entzünden, es kann eine Explosion erfolgen (Bild 21).



❖ **Experiment «Entzündbarkeit und Brennverhalten von Stäuben»**

Beim Versuch, verschiedene abgelagerte Stäube zu entzünden, reagieren gewisse Feststoffe mit einem örtlichen Brennen bzw. Glimmen, andere mit einem Zersetzen unter Ausbreitung eines Glimmbrandes oder einem raschen Durchbrennen unter Feuererscheinung.

❖ **Experiment «Schwelgasbrand»**

Erhitzte brennbare Stäube können Dämpfe oder Schwelgase abgeben, die im Gemisch mit Luft entzündet werden können.

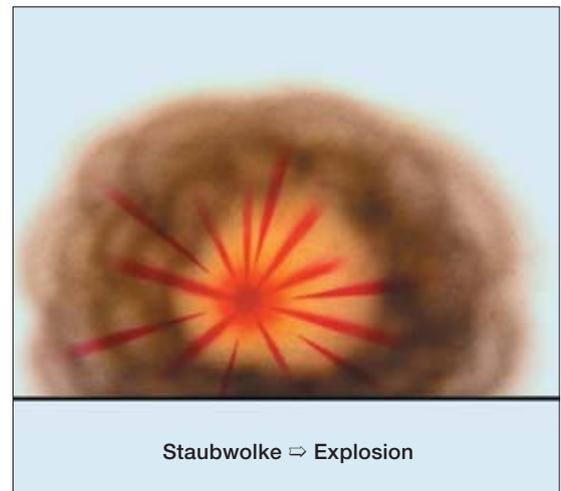


Bild 21: Unterschied zwischen Brand und Explosion bei brennbaren Stäuben [3].



Abgelagerte brennbare Stäube dürfen nicht mit Pressluft weggeblasen, sondern müssen mit einem explosionsgeschützten Staubsauger abgesaugt werden.

Mitunter können diese Gefahren in Kombination auftreten oder sich wechselseitig bedingen.

Staubexplosionen ereignen sich relativ selten, doch wenn sie eintreten, sind deren Auswirkungen oft schwerwiegend.

7 Gefährliche brennbare Stoffe – Übersicht



Explosionsschutzmassnahmen müssen getroffen werden für alle

- brennbaren Gase
- brennbaren Flüssigkeiten mit einem Flammpunkt unter 30 °C
- brennbaren Flüssigkeiten mit einem Flammpunkt über 30 °C, wenn sie über ihren Flammpunkt erwärmt werden
- brennbaren Flüssigkeiten, die als Nebel auftreten und
- brennbaren Stäube mit einer Teilchengrösse unter 0,5 mm

Angaben über die wichtigsten Kenngrössen finden Sie im Suva-Merkblatt «Sicherheits-technische Kenngrössen von Flüssigkeiten und Gasen» (Bestellnummer 1469) sowie in den entsprechenden Sicherheitsdatenblättern. Damit können die Brand- und Explosionsrisiken für den Normalbetrieb weitgehend beurteilt werden.

Auch im Sonderbetrieb müssen die Gefahren berücksichtigt und die geeigneten Explosionsschutzmassnahmen getroffen werden.

8 Brennbare Stoffe in Kontakt mit anderen Stoffen

8.1 Inkompatible Stoffe

Brennbare und leichtbrennbare Flüssigkeiten sowie wässrige Lösungen können bei Kontakt mit gewissen Stoffen eine gefährliche Reaktion auslösen (Bild 22); es handelt sich um **unverträgliche Stoffe** (= inkompatible Chemikalien).

Durch eine korrekte Lagerhaltung muss sichergestellt werden, dass jeglicher Kontakt von brennbaren Flüssigkeiten mit Peroxiden, Chromsäure, Salpetersäure oder Halogenen vermieden wird.



Bild 22: Unverträgliche Stoffe.

✦ Experiment «Reaktion von leichtbrennbaren Flüssigkeiten mit Oxidationsmitteln»

Eine leichtbrennbare Flüssigkeit (z. B. Isopropanol) wird mit einem Oxidationsmittel (z. B. Chromsäure) zusammengebracht; es kommt sehr rasch zu einem Brand.

✦ Experiment «Metalle, die entzündliche Gase entwickeln»

Alkalimetalle wie Kalium und Natrium entwickeln bei **Berührung mit Wasser** leichtentzündlichen Wasserstoff, der sich ohne Einwirkung einer Fremdzündquelle selbsttätig entzünden kann.

8.2 Vermischen mit leichtbrennbaren Flüssigkeiten

Das Vermischen von brennbaren mit leichtbrennbaren Flüssigkeiten führt Jahr für Jahr zu sehr schweren Schadenfällen. Wird z. B. Heizöl mit einem Flammpunkt von ungefähr 75 °C mit Benzin verunreinigt, so fällt der Flammpunkt bei einem Benzanteil von lediglich 3 Vol.-% bereits unter die Raumtemperatur (Bild 23). Solche Bedingungen werden **häufig in Heizöltanks oder in Vorratsbehältern von Altöl bzw. Reinigungsanlagen** festgestellt. Verursacht werden sie gewöhnlich durch nachlässiges Verhalten.

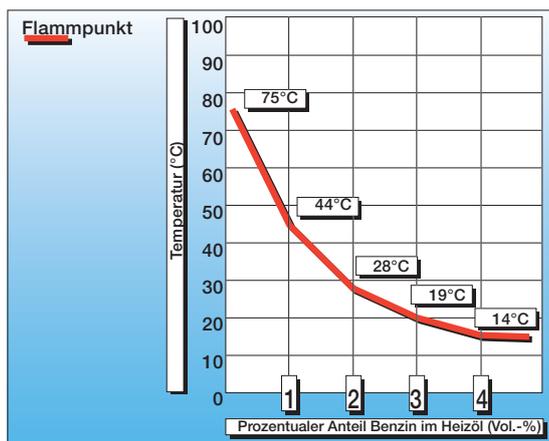


Bild 23: Abhängigkeit des Flammpunktes vom prozentualen Anteil an Benzin im Heizöl [6].

✳ Experiment «Vermischen von Heizöl mit Benzin»

Beispiel aus der Praxis: Der Chauffeur eines Tankwagens hatte beim Wechsel von Benzin auf Heizöl den Tank und die Leitungen des Fahrzeuges nicht vollständig entleert. So wurde beim nächsten Kunden **mit Benzin verunreinigtes Heizöl** abgeladen. Dadurch bildete sich über der Flüssigkeitsoberfläche im Kunden-Tank eine explosionsfähige Atmosphäre.

Als Wochen später ein Tankrevisor Anpassungsarbeiten am Heizöltank vornehmen musste, ereignete sich eine schwere Explosion, da der Revisor nicht mit dem Vorhandensein von Benzindämpfen gerechnet hatte und Funken erzeugende Arbeiten ausführte, ohne spezielle Schutzmassnahmen zu treffen. Durch die Explosion barst der Heizöltank an der Reissnaht. Der Mann brannte lichterloh und verschied 10 Tage später infolge der schweren Brandverletzungen an einem Nierenversagen.

Die Bedeutung von Schadenfällen, die auf das Vermischen von brennbaren mit leichtbrennbaren Flüssigkeiten zurückzuführen sind, nimmt ständig zu, wobei das gestiegene Umweltbewusstsein ebenfalls dazu beiträgt, indem z. B. **Lösemittelreste in Altölfässer oder -tanks** geschüttet werden.

9 Fassexplosionen

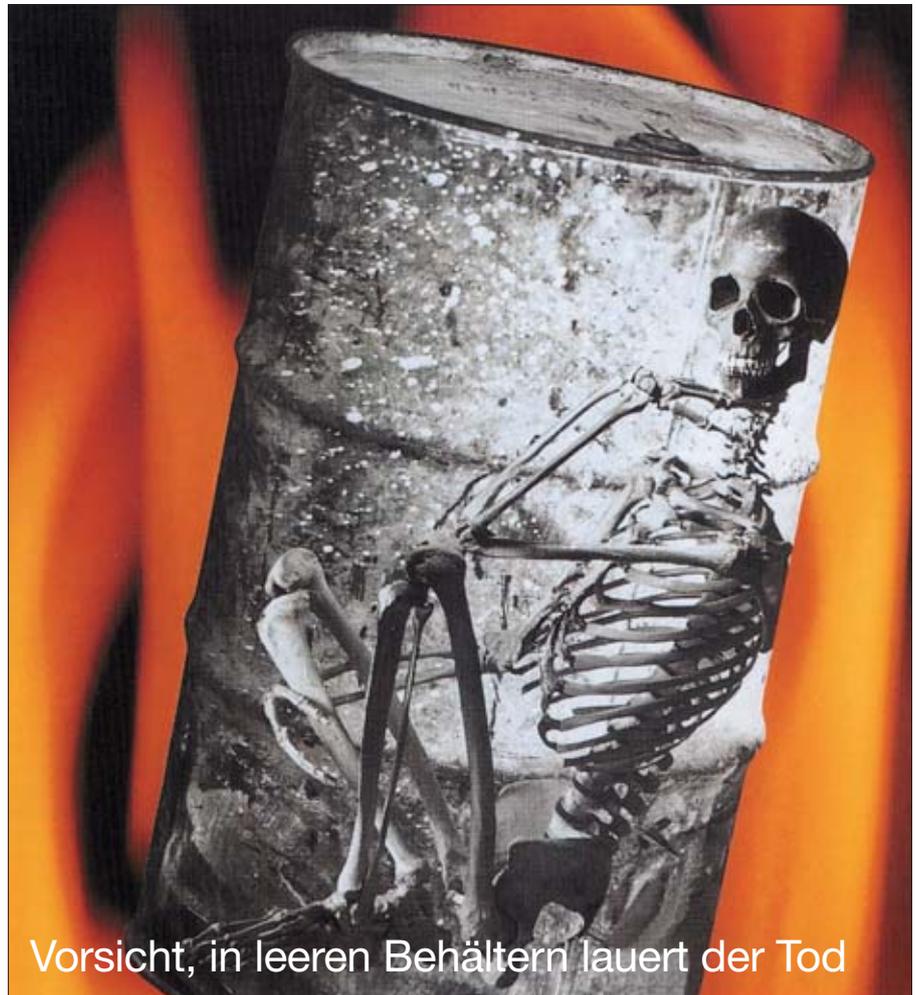


Bild 24: Explosionsgefahren in Behältern [7].

Vorratsbehälter wie Tanks, Fässer, Kannen, die leichtbrennbare Flüssigkeiten wie Benzin, Nitroverdünner, Aceton, Alkohol oder Toluol enthielten, sind als sehr gefährlich zu betrachten.

★ **Experiment «Explosion in einem vermeintlich leeren Behälter»**

Werden Behälter, die leichtbrennbare Flüssigkeiten enthalten, so weit geleert, dass sich keine Flüssigkeit mehr in ihnen befindet, so sind trotzdem **noch genügend Dämpfe** im Innern vorhanden, um beim Annähern einer wirksamen Zündquelle eine Explosion auszulösen (Bild 24).



Schon zwei Esslöffel oder ein Schnapsglas einer leichtbrennbaren Flüssigkeit genügen, um im Innern eines 200-l-Fasses eine explosionsfähige Atmosphäre zu bilden.

Werden an Behältern Schweissarbeiten ausgeführt oder wird versucht, mittels Brennschneiden oder Trennschleifen die Deckel abzutrennen, oder wird gar mit einer offenen Flamme in die Behälter geleuchtet, so kann es zu einer Explosion kommen. Die vielen schweren Schadenfälle, die in diesem Zusammenhang immer wieder auftreten, zeigen, dass diese Gefahr sehr oft nicht erkannt wird.

Da die notwendigen Schutzmassnahmen erfahrungsgemäss nicht einfach auszuführen sind, empfiehlt es sich, solche Arbeiten gar nicht oder nur an fabrikneuen Fässern vorzunehmen.

★ **Experiment «Schweissarbeiten an <gereinigten> leeren Fässern»**

Beispiel aus der Praxis: Ein Schlosser hatte den Auftrag, ein altes leeres Eisenfass, das vorher Benzin enthalten hatte und bereits seit mehreren Monaten auf einem Lagerplatz stand, der Länge nach aufzutrennen. Als erstes steckte er einen Wasserschlauch ins Fass, füllte dieses und liess anschliessend das Wasser für einige Minuten überlaufen, ehe er den Wasserhahn zudrehte und danach das Wasser durch den Einfüllstutzen wieder ausfliessen liess. Als er mit der Funken erzeugenden Arbeit begann, explodierte das Fass trotz der vorgängig getroffenen «Vorsichtsmassnahme», wobei er erheblich verletzt wurde.

Da Benzin in Wasser praktisch unlöslich ist, ist es nicht möglich, einen Behälter durch Wässern «gasfrei» (frei von Lösemiteldämpfen) zu machen.



**LEER IST NICHT LEER –
EXPLOSIONSGEFAHR!**
Keine Funken erzeugende Arbeiten wie Schweissen und Schneiden an gebrauchten Fässern ausführen.

10 Zündquellen

Unter vielen möglichen Zündquellen ist in der betrieblichen Praxis nur eine geringe Zahl von grosser Bedeutung (Bild 25). Zündquellen sind wirksam, wenn sie so viel Energie an die explosionsfähige Atmosphäre abgeben, dass eine selbständige Fortpflanzung der Verbrennung eintritt.

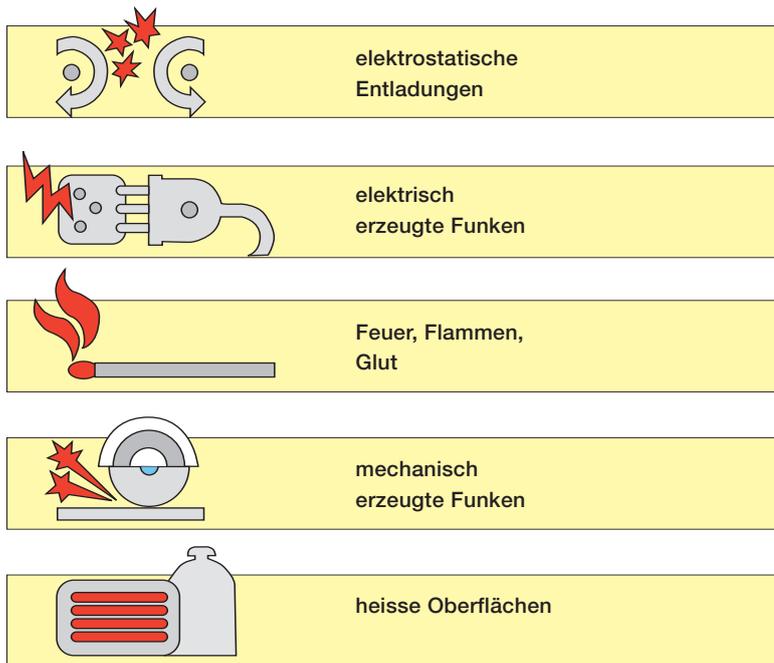


Bild 25: Mögliche Zündquellen [6].

10.1 Flammen

Offene Flammen und Glut – vor allem verursacht durch Feuerungsanlagen sowie Schweißen und Schneiden – zählen zu den wirksamsten Zündquellen.

Die «Schweisserlaubnis» als organisatorische vorbeugende Explosionsschutzmassnahme ist im Betrieb konsequent anzuwenden.

10.2 Heisse Oberflächen

☆ Experiment «Entzündung durch heisse Oberfläche»

Es ist nicht notwendig, dass eine Oberfläche rot glühend ist; auch **heisse Oberflächen** mit Temperaturen um 500 °C sind genügend energiereich, um ein Brennstoff-Luft-Gemisch (sogar von Ölen mit einem hohen Flammpunkt) zu entzünden.

Die Oberflächentemperatur darf die Zündtemperatur des Brennstoffes niemals überschreiten.

Das Vermeiden von wirksamen Zündquellen ist in der Praxis als alleinige Massnahme im Allgemeinen nicht sicher genug; deshalb sind häufig weitere Schutzmassnahmen erforderlich.

10.3 Statische Elektrizität

Ebenfalls grosse Bedeutung kommt den Entladungsfunken von elektrostatischen Aufladungen zu. Statische Elektrizität kann durch eine Vielzahl von Trennprozessen entstehen. Eine elektrostatische Aufladung allein stellt jedoch nicht notwendigerweise eine Zündgefahr dar. Erst wenn die Aufladung so hoch wird, dass Entladungen auftreten, kann Zündgefahr bestehen. In der Praxis haben sich Entladungsfunken als Zündquellen von explosionsfähigen Atmosphären in zwei Fällen als besonders häufig erwiesen:

- **Umfüllen**, Fördern, Rühren, Verdüsen unpolarer Flüssigkeiten (z. B. aliphatische und aromatische Kohlenwasserstoffe, Ether), die einen spezifischen Widerstand von mehr als 10^8 Ohm aufweisen (Bild 26).

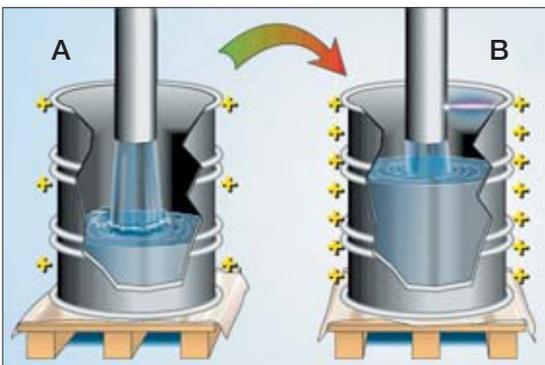


Bild 26: Entladung bei Metallfass [2].

- A: Trennprozess und Aufladung
- B: Funkenentladung

Nur leitfähige Rohre, Schläuche, Behälter usw. verwenden und diese erden.

- **Gehen mit isolierenden Schuhsohlen** auf einem Boden (Bild 27), z. B. Teppich oder kunststoffbeschichteter Fussboden.

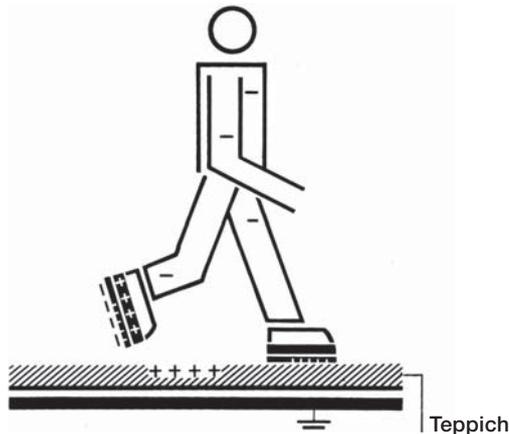


Bild 27: Ladungstrennung (Trennprozess) beim Gehen auf dem Fussboden [8].

Personen durch ableitfähige Schuhe und Fussböden erden.

Weiter gehende Angaben über statische Elektrizität können Sie den folgenden Publikationen entnehmen:

- IVSS-Broschüre «Statische Elektrizität, Zündgefahren und Schutzmassnahmen» (Nr. 2017 G).
- ESCIS-Heft Nr. 2 «Statische Elektrizität – Regeln für die betriebliche Sicherheit»
- Interaktives Lernprogramm der ESCIS «Statische Elektrizität»

10.4 Elektrische Betriebsmittel

Gelegentlich lösen auch elektrische Betriebsmittel und Installationen Brände und Explosionen aus. In der Regel handelt es sich dabei um elektrische Schaltfunken oder Funken von offenen Kollektormotoren.

★ Experiment «Entzündung durch nicht ex-geschützte Handlampe»

Beispiel aus der Praxis: Eine Gruppe von Tankspezialisten musste Anpassungsarbeiten an einer Heizöltankanlage vornehmen. Dazu hatten sie eine Polyesterbeschichtung in den Tank einzubringen. Für die Reinigung der Beschichtungswerkzeuge nahmen die Monteure einen mit Aceton gefüllten Kessel in den Tank mit. Eine Handlampe von nicht explosionsgeschützter Bauart wurde mit Hilfe eines Magnets an der Tankwand angebracht. Durch das Arbeiten mit dem leichtbrennbaren Aceton im Tank entstanden Dämpfe, die sich an der Tanksohle sammelten und von der Absaugung nicht erfasst wurden. Während der Arbeit blieb ein Monteur plötzlich am Kabel der Handlampe hängen, diese fiel zu Boden und zerbrach. Sofort fing es an zu brennen, und der Monteur liess den Kessel mit dem Aceton fallen. Trotz schwerer Verbrennungen konnte er brennend dem Tank entsteigen. Wie aus diesem Schadenfall ersichtlich wird, reicht auch die **Energie eines Wendels einer Glühbirne** aus, um ein explosionsfähiges Gemisch zu entzünden.



In explosionsgefährdeten Bereichen dürfen nur explosionsgeschützte elektrische Betriebsmittel eingesetzt werden.

10.5 Chemische Reaktionen

★ Experiment «Entzündung von öligen Putzfäden»

Hohe Temperaturen werden auch durch **chemische Reaktionen** erzeugt. Dadurch können brennbare Stoffe entzündet werden. Erhitzt sich ein brennbarer Stoff infolge eines internen, Wärme erzeugenden Vorganges (Exothermie: z. B. chemischer Zerfall, Oxidation, Gärung von Bakterien), so kann es, wenn die entstandene Wärme nicht genügend rasch abfliessen kann (adiabatische Bedingungen), zur Selbstentzündung kommen. Diese Gefahr erhöht sich bei niedriger Entzündungstemperatur des betreffenden Stoffes, bei grosser Materialoberfläche (Halme, Späne, Fäden, Körner, Pulver, Staub), bei Hemmung des Wärmeabflusses nach aussen (schlechte Wärmeleitfähigkeit, gepresste Packung, hohe Umgebungstemperatur) sowie bei Zutritt von Sauerstoff und Feuchtigkeit (Pilz- und Bakterientätigkeit).

Solche Brände entstehen meist ganz unerwartet und erst nach längerer Lagerzeit. Mischungen von miteinander reagierenden Chemikalien können jedoch sehr schnell zu Brandausbrüchen führen.



Ölige Putzfäden und Lappen nicht offen herumliegen lassen, sondern in verschlossenen Blechbehältern aufbewahren.

11 Relative Dichte

✳ Experiment «Ausbreitung von Gasen und Dämpfen»

Beim Verwenden bzw. Handhaben leichtbrennbarer Flüssigkeiten oder brennbarer Gase entstehen Dampf-(bzw. Gas-)Luft-Gemische, die sich im Raum oder in der Umgebung ausbreiten können. Die explosionsfähige Atmosphäre kann deshalb auch eine weit entfernte Zündquelle erreichen. Da das System nicht verdämmt ist, entsteht keine Explosion, sondern ein **Flächenbrand**, der sich rasch ausbreitet.

✳ Experiment «Ausleeren von Gasen und Dämpfen»

Gasförmiges Butan kann in einen Becher abgefüllt werden. Weil das Gas **schwerer als Luft** ist, kann es in einen zweiten Becher geleert und dort entzündet werden.

Ob explosionsfähige Gemische sich in Bodennähe oder nach oben bewegen, ist stoffspezifisch und hängt vom relativen «Gewicht» bzw. von der **Dichte** des betreffenden Stoffes ab.



Bild 28: Ausbreitungsverhalten am Beispiel von Flüssiggas [1].

✳ Experiment «Dämpfe in einer Kanalisation»

Zahlreiche Schadenfälle zeigen, dass bei Dämpfen und Gasen, die schwerer sind als Luft, grösste Vorsicht geboten ist, wenn sie in Gruben, Schächte, Tanks, Kanäle, unterflur liegende Räume und dergleichen gelangen können (Bild 28) oder wenn mit ihnen in solchen Räumen umgegangen wird.

Gase und Dämpfe in unterflur liegenden oder engen Räumen können nur mittels künstlicher Lüftung entfernt werden.

❖ **Experiment «Ausbreitung von Lösemitteldämpfen in einem Treppenhaus»**

Beispiel aus der Praxis: Zwei Bodenleger klebten mit einem lösemittelhaltigen Klebstoff einen Spannteppich auf eine Treppe, die in den Keller sowie in den Heizraum eines Hauses führte. Der Treppenraum war nur durch zwei offene Kellerfenster gelüftet. Als die Arbeit beendet war, kam es plötzlich zu einer heftigen Explosion. Das Dach des Hauses wurde abgehoben und die Decken beschädigt. Ein Brand brach aus und die beiden Bodenleger rannten durch die Flammen ins Freie. Dabei erlitten sie schwere Brandverletzungen. Der eine starb am selben Tag, der andere einige Tage später. Das aus dem Klebstoff verdampfende **Lösemittel** hatte sich wegen der mangelnden Lüftung **im Keller angesammelt** und war in den Heizraum gelangt, wo sich die Dämpfe an der offenen Brennerflamme entzündeten.

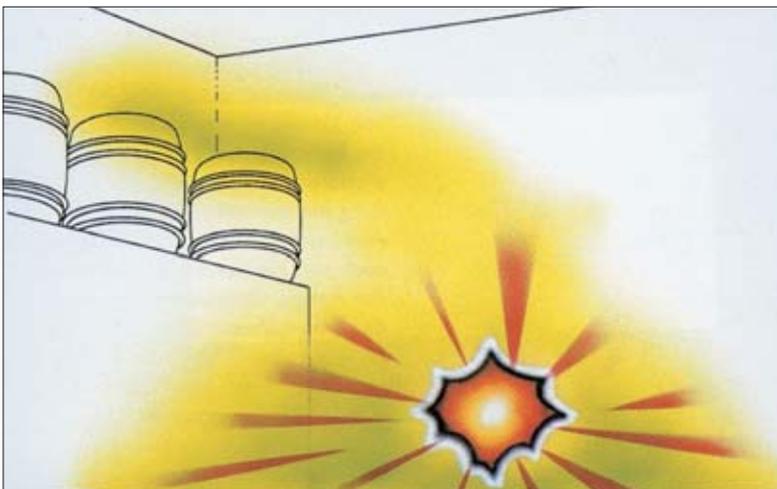


Bild 29: Verhalten von Lösemitteldämpfen.

❖ Die Dämpfe aller brennbaren Flüssigkeiten sind schwerer als Luft!

Weiter gehende Angaben zu solchen Risiken und zu den erforderlichen Massnahmen finden Sie im Suva-Merkblatt «Schutzmassnahmen beim Verlegen von Wand- und Bodenbelägen» (Bestellnummer 11045).

❖ **Bereiche, in denen mit leichtbrennbaren Flüssigkeiten oder brennbaren Gasen umgegangen wird, müssen künstlich gelüftet bzw. abgesaugt werden.**

❖ **Experiment «Ausbreitung von Erdgas im Treppenhaus»**

Beispiel aus der Praxis: Im Keller eines Wohnhauses befand sich die Einführung der Gasleitung. Durch eine Leckstelle trat Erdgas in den Keller aus. Da Methan leichter als Luft, stieg es durch die offenen Türen im Treppenhaus auf. Die Zündquelle konnte nachträglich nicht mehr eruiert werden, da das mehrgeschossige Haus nach der Explosion einstürzte und fünf Personen unter den Trümmern begrub.

❖ **Im Gegensatz zu den Flüssigkeitsdämpfen können Gase auch leichter sein als Luft. Dies trifft zu auf Acetylen, Ammoniak, Blausäure, Ethylen, Kohlenmonoxid, Methan (Erdgas, Faulgas) und Wasserstoff. Alle andern brennbaren Gase (z. B. Propan) sowie ihre Gemische mit Luft sind schwerer als Luft.**

12 Explosionsschutzmassnahmen

Nachdem die häufigsten Brand- und Explosionsrisiken anhand einfacher Beispiele erläutert worden sind, gilt es nun, die wichtigsten Explosionsschutzmassnahmen für die in den Betrieben vorhandenen Einrichtungen, Anlagen, Arbeitsmittel und Situationen aufzuzeigen. Wir unterscheiden zwischen vorbeugenden und konstruktiven Massnahmen.

12.1 Vorbeugende Massnahmen

- **Ersatz** der leichtbrennbaren Flüssigkeiten bzw. der brennbaren Gase und Stäube durch solche, die keine explosionsfähige Atmosphäre zu bilden vermögen.
- **Verwenden geschlossener Systeme**, die weitgehend verhindern, dass explosionsfähige Atmosphären ausserhalb des Systems auftreten.
- **Lüftungsmassnahmen**, die das Ansammeln bzw. Bilden explosionsfähiger Atmosphäre verhindern bzw. einschränken. Ausströmende Gase und Dämpfe leichtbrennbarer Flüssigkeiten müssen ausreichend **verdünnt** werden.

★ Experiment «Absaugen von Gasen und Dämpfen»

Wird beim Umgang mit leichtbrennbaren Flüssigkeiten oder mit Gasen, die schwerer sind als Luft, die Mündung der Absaugung nicht unmittelbar über Boden angeordnet, so ist die Lüftung praktisch zwecklos, da bei dieser Anordnung nicht die Dämpfe, sondern Luft abgesaugt wird.

Bei Dämpfen und Gasen, die schwerer sind als Luft, müssen die Abluft- bzw. Absaugöffnungen in Bodennähe eingerichtet werden, und bei Gasen, die leichter als Luft sind, in Deckennähe (Bild 30).

Für das Abschätzen der effektiven Lüftungsleistung darf man in der Praxis normalerweise nur mit der Hälfte oder einem Viertel der Nennleistung des Ventilators rechnen.

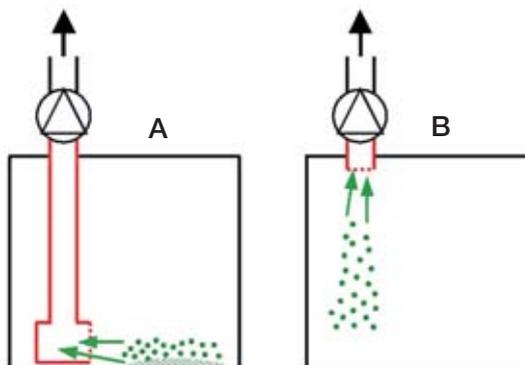


Bild 30: Richtige Anordnung der Abluftöffnungen.

A: Bei Dämpfen und Gasen, die schwerer sind als Luft.

B: Bei Gasen, die leichter sind als Luft.

★ Experiment «Raumlüftung und Absaugen»

Ohne ausreichende Lüftung breiten sich Dämpfe, die beim Umfüllen von leichtbrennbaren Flüssigkeiten entstehen, dicht über dem Fussboden im ganzen Raum aus. Werden sie auf der gegenüberliegenden Seite des Raumes unmittelbar über dem Boden abgesaugt, werden sie zwar laufend entfernt, doch bleibt die Gefährdung im ganzen Raum bestehen. Sinnvoller und ökonomischer ist es, die Dämpfe in der Nähe der Abfüllstelle oder noch besser direkt am Rand des Behälters (**Quellenabsaugung**) abzusaugen und so den gefährdeten Bereich stark einzuschränken.

★ Experiment «Druckabfall im Rohr»

Je grösser die an einem Ventilator angeschlossene Schlauch- oder Leitungslänge ist und je mehr Krümmungen vorhanden sind, desto mehr nimmt – aufgrund des Druckabfalls im Rohr – die effektive Lüftungsleistung ab.

- **Inertisierung** von Apparaturen und Anlagen

★ **Experiment «Inertisierung»**

In einem Silo mit aufgewirbeltem brennbarem Staub kommt es trotz wirksamer Zündquelle zu keiner Explosion, da der Sauerstoffgehalt durch genügend Zugabe von Stickstoff in den nichtexplosionsfähigen Bereich (unter die Sauerstoffgrenzkonzentration) fällt (Bild 31).



Bild 31: Inertisierung mit Stickstoff und Überwachen der Sauerstoffkonzentration [3].

- **Vermeiden von wirksamen Zündquellen.** Diese Massnahme soll stets angewendet werden, es sei denn, die explosionsfähige Atmosphäre wird mit Sicherheit vermieden. Sie ist jedoch in der Praxis als alleinige Massnahme im Allgemeinen nicht sicher genug.

Das Vermeiden von wirksamen Zündquellen als alleinige Schutzmassnahme erfordert eine entsprechende Risikoanalyse.

12.2 Konstruktive Massnahmen

- **Explosionsunterdrückung** mit einem Löschsystem, das eine Explosion durch geeignete Detektoren entdeckt und unterdrückt.

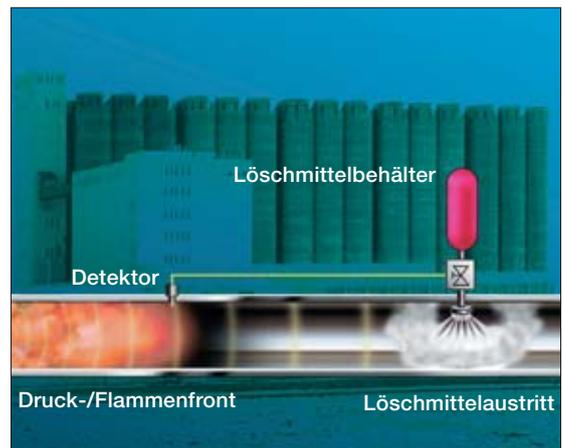


Bild 32: Automatische Löschmittelsperre [5].

★ **Experiment «Explosionsunterdrückung/Löschmittelsperre»**

Die Explosionsunterdrückungsanlage erkennt frühzeitig die anlaufende Explosion mittels Flammen- oder Druckdetektor und unterdrückt die Explosion in der Anlaufphase durch **schnelles Einblasen von Löschmitteln** (Bild 32 und 34 C).

- **Explosionstechnische Entkopplung**, um ein Weiterlaufen einer Explosion in ungeschützte Anlageteile zu verhindern.

★ **Experiment «Flammensperre»**

Entzündet man ein Gas-Luft-Gemisch in einem Rohr, das mit einer Flammensperre ausgerüstet ist, z. B. mit einer Explosionsrohrsicherung (Bild 33) oder einem Davy-Sieb, wird die durch das Rohr laufende Flamme so stark abgekühlt, dass sie erlischt.

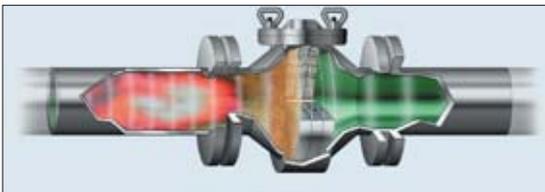


Bild 33: Explosionsrohrsicherung [1].

- **Explosionsfeste Bauweise** von Behältern und Anlagen, einschliesslich verbindender Rohrleitungen, so dass sie dem zu erwartenden Explosionsüberdruck standhalten, ohne aufzureissen.

★ **Experiment «Explosionsfeste Bauweise»**

Liegt der Anfangsdruck in einem geschlossenen Behälter bei Atmosphärendruck, so wird der maximale Explosionsüberdruck nach der Entzündung eines Alkoholdampf-Luft-Gemisches weniger als 10 bar betragen.

Ein Stahlbehälter, der entsprechend konstruiert ist, kann diesem Druck standhalten (Bild 34 A).

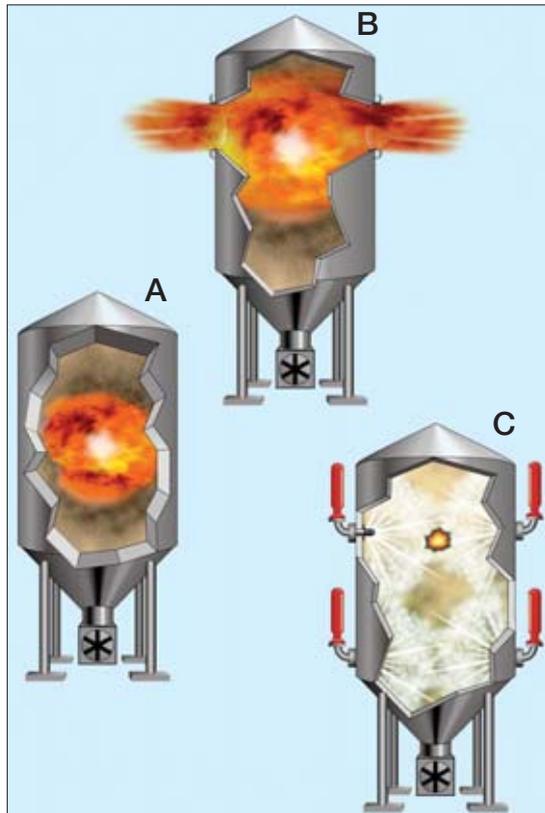


Bild 34: Beispiele von Massnahmen des konstruktiven Explosionsschutzes [3].

- A: Explosionsfeste Bauweise.
- B: Explosionsdruckentlastung.
- C: Explosionsunterdrückung.

- **Explosionsdruckentlastung** durch eine Sollbruchstelle (Bild 34 B), die sich bei einem definierten Druck öffnet, der deutlich unterhalb der Behälterfestigkeit liegen muss. Einrichtungen hierfür sind z. B. ausreichend grosse Berstscheiben oder Explosionsklappen.

★ **Experiment «Berstscheibe»**

In einem Stahlbehälter, der bei einer definierten Öffnung mit einer Aluminiumfolie abgeschlossen ist, wird ein explosionsfähiges Alkoholdampf-Luft-Gemisch entzündet. Durch den Explosionsüberdruck wird die Aluminiumfolie zerstört und es kommt zur gewollten Druckentlastung.



Druckentlastung immer in «ungefährliche Richtung», nicht in den Arbeitsraum!

12.3 Organisatorische Massnahmen

Organisatorische Massnahmen können einerseits das Brand- und Explosionsrisiko begrenzen und andererseits die Auswirkungen auf Mensch, Sachwerte und Umwelt vermindern.



Bild 35: Beispiele von organisatorischen Massnahmen.

Organisatorische Massnahmen im Sicherheits-Management-System festlegen!

Organisatorische Massnahmen erhöhen und ergänzen die Wirksamkeit der vorbeugenden und konstruktiven Explosionsschutzmassnahmen.

13 Bildnachweis

- [1] Ott R. J., Scheller F. et al., «Gasexplosionen» (No. 2032), IVSS (Internationale Vereinigung für Soziale Sicherheit) Sektion Chemie, Heidelberg (1999).
- [2] Glor M., Ott R. J. et al., «Statische Elektrizität, Zündgefahren und Schutzmassnahmen» (No. 2017), IVSS (Internationale Vereinigung für Soziale Sicherheit) Sektion Chemie, Heidelberg (1995).
- [3] Ott R. J., Radandt S. et al., «Staubexplosionen» (No. 2044), IVSS (Internationale Vereinigung für Soziale Sicherheit) Sektion Chemie, Heidelberg (2002).
- [4] Fischer K.-H., Ott R. J., Scheller F. et al., «Sicherheit von Flüssiggasanlagen» (No. 2004), IVSS (Internationale Vereinigung für Soziale Sicherheit) Sektion Chemie, Heidelberg (1992).
- [5] Beck H., Ott R. J., Zockoll C. et al., «Staubexplosionsschutz an Maschinen und Apparaten – Grundlagen» (No. 2033), IVSS (Internationale Vereinigung für Soziale Sicherheit), Sektion Maschinen- und Systemsicherheit, Mannheim (1998).

Zu beziehen bei:

BG Chemie (IVSS-Sektion Chemie, Sekretariat), Kurfürsten Anlage 62, D-69115 Heidelberg

BG Nahrungsmittel und Gaststätten (IVSS-Sektion Maschinen- und Systemsicherheit, Sekretariat), Dynamostrasse 7–11 D-68165 Mannheim

Suva

Kundendienst
Postfach
CH-6002 Luzern

- [6] Suva (Schweizerische Unfallversicherungsanstalt), «Sicherheit beim Umgang mit Lösemitteln», Suva, Bereich Chemie, Luzern, 5., überarbeitete Auflage (2001).
Bestellnummer: SBA 155.
- [7] Suva (Schweizerische Unfallversicherungsanstalt), «Vorsicht, in leeren Behältern lauert der Tod», Suva, Bereich Chemie, Luzern, 16., überarbeitete Auflage (1997).
Bestellnummer: 44047.

Zu beziehen bei:

Suva
Kundendienst
Postfach
CH-6002 Luzern

- [8] ESCIS (Expertenkommission für Sicherheit in der chemischen Industrie der Schweiz), «Statische Elektrizität, Regeln für die betriebliche Sicherheit», ESCIS-Schriftenreihe Sicherheit, Heft 2, Suva, Bereich Chemie, Luzern (1997).

Zu beziehen bei:

ESCIS, c/o Suva
Bereich Chemie
Postfach
CH-6002 Luzern

Suva

Postfach, 6002 Luzern

Tel. 041 419 58 51

www.suva.ch

Ausgabe Februar 2014

Bestellnummer

44071.d