

Quelle: <https://www.arbeitssicherheit.de//document/db4c1774-a39d-3044-8eac-91d31c56c6b0>

Bibliografie

Titel	Praxishandbuch Brandschutz
Herausgeber	Scheuermann
Auflage	2016
Abschnitt	2 Grundlagen des Brand- und Explosionsschutzes → 2.1 Ziele des Brandschutzes
Autor	Scheuermann
Verlag	Carl Heymanns Verlag

2.1.2 Gefährdung durch Brand

Versucht man sich einem vorgegebenen Thema zuzuwenden, so sollte als Erstes möglichst genau abgeklärt werden, um was es sich dabei handelt. Im technischen bzw. naturwissenschaftlichen Bereich ist dieses relativ einfach, da zumeist auf allgemein anerkannte Definitionen, in vielen Fällen jedoch auch auf normenmäßig festgelegte Begriffe, Messanordnungen oder Bewertungsschemata zurückgegriffen werden kann. In dem hier zu behandelnden Abschnitt geht es zunächst um den Begriff »Brand« einschließlich seiner »Sonderform« der Explosion, eine zunächst einfach erscheinende Aufgabe, die jedoch durch die zumeist damit verknüpften strafrechtlichen (Brandstiftung, [§ 306 StGB](#) und Herbeiführen einer Sprengstoffexplosion, [§ 308 StGB](#)) oder auch versicherungsrechtlichen Folgerungen besondere Sorgfalt erfordert.

Relativ einfach ist der Unterschied in der Phänomenologie dieser beiden Ereignisse Brand und Explosion aufgrund des Schadensbildes darzustellen und zu differenzieren, unter der Voraussetzung, dass sie unvermischt auftreten (s. Abb. 1 und Abb. 2).



Abb. 1: Brandschaden eines Hauses



Abb. 2: Mehlstaubexplosion der Wesermühle, Hameln 1887

Allgemeine Grundlagen der Verbrennungsprozesse

Versucht man nun die Ursachen für diese beiden, in ihrer Auswirkung so unterschiedlichen Phänomene zu ergründen, so lässt sich einfach ableiten, dass sie gemeinsam mit der Zündung eines energieliefernden, zumeist eindeutig oxidativ ablaufenden chemischen Umsetzungsprozesses beginnen. Um diese Reaktion einzuleiten, sind nach Emmons drei materielle bzw. energetische Voraussetzungen notwendig:

- Brennstoff
- Oxidationsmittel
- Zündquelle bzw. Zündenergie.

2.1.2 Gefährdung durch Brand – Seite 2 – 01.06.2013 >>

Alle drei müssen am gleichen Ort, aber auch zur gleichen Zeit zusammentreffen, damit zunächst allein die Möglichkeit einer Zündung gegeben ist (räumliche und zeitliche Koinzidenz). Wenn diese Grundvoraussetzung gegeben ist, müssen noch die folgenden Zusatzparameter erfüllt sein, damit es zu einer Primärzündung kommt:

- Brennstoff und Oxidationsmittel müssen innerhalb der Zündgrenzen miteinander vermischt oder zumindest vermischtbar sein,
- die dargebotene Zündenergie, zumeist in Form einer konkreten Zündquelle, muss für das jeweils vorhandene System aus Brennstoff und Oxidationsmittel effektiv wirksam sein.

Emmons hat diese Voraussetzung für den Eintritt einer Zündung graphisch in Form eines Tetraeders dargestellt. Hierbei bilden Brennstoff, Oxidationsmittel und Zündenergie die Ecken eines gleichschenkligen Dreiecks, welches durch den weiteren Eckpunkt Zündung/Rückzündung zur räumlichen Figur des Tetraeders ergänzt wird. Die zusätzlich notwendigen Randbedingungen ergänzen diese übersichtliche geometrische Struktur (s. Abb. 3).

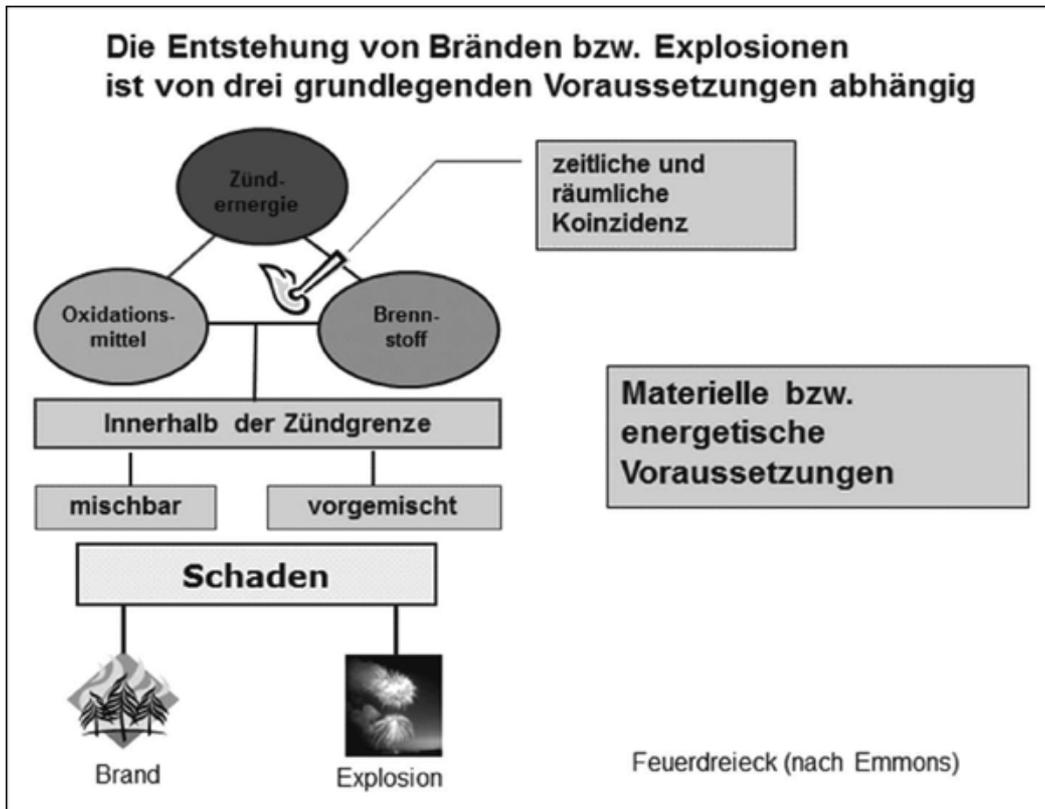


Abb. 3: Emmons-Tetraeder

Praktische Anwendung gefunden hat dieses Zündungsmodell nach Emmons in der Betriebssicherheitsverordnung (BetrSichV) und den hierzu erlassenen Technischen Regeln für Betriebssicherheit TRBS 2152 und folgende sowie den gleichlautenden Technischen Regeln für Gefahrstoffe

2.1.2 Gefährdung durch Brand – Seite 3 – 01.06.2013 << >>

TRGS 720 und folgende »Gefährliche explosionsfähige Atmosphäre – Allgemeines«. Gleichmaßen findet dieses Zündungsmodell in der der Gefahrstoffverordnung (GefStoffV) zugrunde liegende Technische Regeln für Gefahrstoffe TRGS 800

»Brandschutzmaßnahmen« Anwendung.

Die Technische Regel für Betriebssicherheit (TRBS 2152) gibt dem Stand der Technik, Arbeitsmedizin und Hygiene entsprechende Regeln und sonstige gesicherte arbeitswissenschaftliche Erkenntnisse für die Bereitstellung und Benutzung von Arbeitsmitteln sowie für den Betrieb überwachungsbedürftiger Anlagen wieder. Sie wird vom Ausschuss für Betriebssicherheit ermittelt und vom Bundesministerium für Arbeit und Soziales im Bundesarbeitsblatt bekannt gemacht. Die Technische Regel konkretisiert die Betriebssicherheitsverordnung (BetrSichV) hinsichtlich der Ermittlung und Bewertung von Gefährdungen sowie der Ableitung von geeigneten Maßnahmen. Bei Anwendung der beispielhaft genannten Maßnahmen kann der Arbeitgeber insoweit die Vermutung der Einhaltung der Vorschriften der Betriebssicherheitsverordnung für sich geltend machen. Wählt der Arbeitgeber eine andere Lösung, hat er die gleichwertige Erfüllung der Verordnung schriftlich nachzuweisen.

Die Technische Regel für Gefahrstoffe (TRGS 720) gibt dem Stand der Technik, Arbeitsmedizin und Hygiene entsprechende Regeln und sonstige gesicherte wissenschaftliche Erkenntnisse für Tätigkeiten mit Gefahrstoffen, einschließlich deren Einstufung und Kennzeichnung, wieder. Sie wird vom Ausschuss für Gefahrstoffe ermittelt und vom Bundesministerium für Arbeit und Soziales im Bundesarbeitsblatt bekannt gemacht. Die Technische Regel konkretisiert die Gefahrstoffverordnung (GefStoffV) hinsichtlich der Ermittlung und Bewertung von Gefährdungen sowie der Ableitung von geeigneten Maßnahmen. Bei Anwendung der beispielhaft genannten Maßnahmen kann der Arbeitgeber insoweit die Vermutung der Einhaltung der Vorschriften der Gefahrstoffverordnung für sich geltend machen. Wählt der Arbeitgeber eine andere Lösung, hat er die gleichwertige Erfüllung der in der Gefahrstoffverordnung enthaltenen Anforderungen in der Dokumentation der Gefährdungsbeurteilung zu begründen.

Diese Schutzmaßnahmen wurden auch in die Verordnung über brennbare Flüssigkeiten (VbF) und die anhängenden Technischen Regeln für brennbare Flüssigkeiten (TRbF) integriert. Die Verordnung über brennbare Flüssigkeiten ist in der Betriebssicherheitsverordnung aufgegangen, die Technischen Regeln für brennbare Flüssigkeiten sind in die TRBS/TRGS 3151/751 »Vermeidung von Brand-, Explosions- und Druckgefährdungen an Tankstellen und Füllanlagen zur Befüllung von Landfahrzeugen« überführt worden.

Die BetrSichV führt eine Dreiteilung der Schutzmaßnahmen gegen Explosionsgefahren (entsprechend den erläuterten Erkenntnissen von Emmons) ein:

1. Maßnahmen, welche eine Bildung gefährlicher explosionsfähiger Atmosphären verhindern oder einschränken (primärer Explosionsschutz).

2.1.2 Gefährdung durch Brand – Seite 4 – 01.06.2013



2. Maßnahmen, welche die Entzündung gefährlicher explosionsfähiger Atmosphären verhindern (sekundärer Explosionsschutz).
3. Konstruktive Maßnahmen, welche die Auswirkung einer nicht vermeidbaren Explosion auf ein unbedenkliches Maß beschränken (tertiärer oder konstruktiver Explosionsschutz).

Die unter 1 zusammengestellten Schutzmaßnahmen werden wie folgt eingeteilt:

- a) Vermeidung oder Einschränkung von Stoffen, die explosionsfähigen Gemische zu bilden vermögen.
- b) Verhinderung oder Einschränkung der Bildung explosionsfähiger Atmosphäre im Inneren von Apparaturen:
 1. Konzentrationen unterhalb der unteren Explosionsgrenze halten (nicht zündfähig, da zu wenig Brennstoff: zu mageres Gemisch),
 2. Konzentrationen oberhalb der oberen Explosionsgrenze (nicht zündfähig, da zu wenig Sauerstoff: zu fettes Gemisch),
 3. Inertisierung (Verdrängung des Sauerstoffs durch inaktive Gase).
- c) Verhinderung oder Einschränkung der Bildung gefährlicher explosionsfähiger Atmosphäre in der Umgebung von Apparaturen:
 1. Verfahrenstechnische Maßnahmen, Bauart und räumliche Anordnung der Betriebsanlagen,
 2. Konstruktion,
 3. Prüfung der Apparaturen auf Dichtigkeit,
 4. Lüftungsmaßnahmen (natürlich oder technisch).
- d) Überwachung der Konzentration in der Umgebung von Apparaturen:
 1. Gaswarnanlagen mit Alarmgabe,
 2. Gaswarnanlagen mit automatischer Auslösung von Schutzmaßnahmen,

3. Gaswarnanlagen mit automatischer Auslösung von Notfunktionen.

Unter 2 werden die folgenden Maßnahmen zusammengefasst:

1.	Zoneneinteilung explosionsgefährdeter Bereiche mit:
----	---

für Gase:

Zone 0: Explosionsgefahr durch ein Gemisch von Luft und Gasen, Dämpfen oder Nebeln ständig oder langfristig

2.1.2 Gefährdung durch Brand – Seite 5 – 01.06.2013 << >>

Zone 1: Explosionsgefahr durch ein Gemisch von Luft und Gasen, Dämpfen oder Nebeln gelegentlich

Zone 2: Explosionsgefahr durch ein Gemisch von Luft und Gasen, Dämpfen oder Nebeln nur selten und dann kurzfristig

und für Stäube:

Zone 20: Explosionsgefahr durch Staub-Luft-Gemische ständig oder langfristig

Zone 21: Explosionsgefahr durch Staub-Luft-Gemische gelegentlich

Zone 22: Explosionsgefahr durch Staub-Luft-Gemische nur selten und dann kurzfristig

2. Umfang der Schutzmaßnahmen

Zu vermeiden sind:

- in Zone 2 betriebsmäßig zu erwartende Zündquellen,
- in Zone 1 wie für Zone 2, außerdem auch Zündquellen durch Betriebsstörungen, mit denen üblicherweise gerechnet werden muss,
- Zone 0 wie für Zone 1, außerdem Zündquellen durch selten auftretende Betriebsstörungen.
- In Zone 20 wie für Zone 0
- In Zone 21 wie für Zone 1
- In Zone 22 wie für Zone 2

Soweit Konsens zwischen Herstellern, Abnehmern und den im Problemkreis engagierten Wissenschaftlern erreicht wird, werden Zündungsszenarien entwickelt zur vergleichenden Risikoabschätzung der Verwendung der verschiedenen Materialien. Diese werden in Normen oder sonstigen Prüfvorschriften festgeschrieben und erlauben einen Vergleich des Zündungsrisikos bzw. des Brandverhaltens unterschiedlicher Substanzen, jedoch nur bei strenger Einhaltung der vorgegebenen Szenario-Konditionen. Diese Messwertreihen sind unter dem Begriff sicherheitstechnische bzw. brandschutztechnische Kennwerte zusammengefasst und können natürlich auch aus naturwissenschaftlich definierten Stoffkonstanten reiner Verbindungen oder ihrer definierten Gemische bestehen (z.B. Dampfdruck als Funktion der Flüssigkeitstemperatur, spezifisches Gewicht, Dichte gegenüber Luft bei Gasen und Dämpfen etc.). Sie sollen in den folgenden Einzeldarstellungen kurz vorgestellt werden, wenn dieses zur Erläuterung des vorliegenden Generalthemas notwendig erscheint.

2.1.2 Gefährdung durch Brand – Seite 6 – 01.06.2013 << >>

Bei den Zündquellen ergeben sich bezüglich international normierter Szenarien in den brandschutzrelevanten Normen die folgenden Modellvorstellungen:

- niedrigerenergetische Zündquellen (Szenario Streichholz oder Feuerzeug) über das Modell des genormten beweglichen Kleinbrenners bei Kontaktzeiten zwischen Brennerflamme und Probenoberfläche bzw. Probenquerschnitt (Kantenbeflammung) mit 10 bis 20 Sekunden (Dauer des Streichholzabbrandes).

Weitere Zündungsszenarien im weitesten Sinne sind:

- aufgebrachte erhitzte Schraubenmutter, Zigarettentest, Papierkissentest, Holz-Kleinkrippe mit wenigen Millilitern Propanol im kreuzweise aufgeschlitzten Sitzpolster gezündet (zur Simulation von bekanntem Vorgehen in öffentlichen Verkehrsmitteln) und anderes mehr,
- mittlere energetische Zündquellen analog einem brennenden, gefüllten Papierkorb bzw. über einem Maschendrahtkorb, gefüllt mit Holzwole zur Simulation von Flugfeuer und strahlender Hitze bei der Differenzierung von harter und weicher Bedachung nach DIN 4102,
- Pyrolysetests in Kleinöfen unter Einwirkung von Gasflammen (Brandschacht nach DIN 4102) oder elektrisch hervorgerufener thermischer Strahlungsbelastung (Wärmestrahler nach DIN 4102-14),
- Ofentests zur Bestimmung der Feuerwiderstandsfähigkeit bezüglich Standfestigkeit und Erhalt des Raumabschlusses mit Belastungstemperaturen entsprechend der Einheitstemperaturzeitkurve (ETK nach DIN 4102) und andere mehr.

Nachdem die unterschiedlichen in der häuslichen und der betrieblichen Praxis auftretenden Zündquellen, ihre Vermeidung bzw. die Verminderung ihrer Effektivität im Modell des Emmons'schen Zündungstetraeders nach den Technischen Regeln für Betriebssicherheit (TRBS) vorgestellt wurden, sollte der zweite Bereich, die für ein Feuer, hier jedoch insbesondere ein Schadenfeuer im Sinne von Explosion oder Brand, erforderlichen Oxidationsmittel und Brennstoffe, kurz vorgestellt werden. Hierbei wird auf die hier wesentlich erscheinenden und für die einzelnen Substanzgruppen wichtigen sicherheitstechnischen Kennwerte kurz eingegangen.

Oxidationsmittel

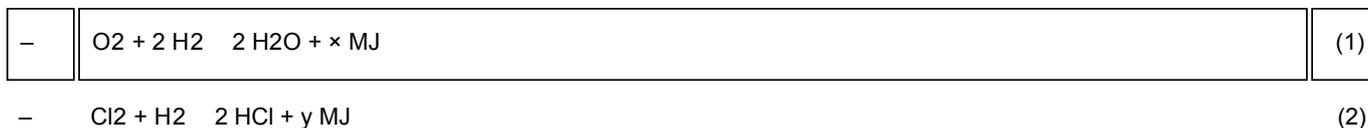
In der DIN 14011:2010 »Begriffe aus dem Feuerwehrwesen« wird unter Punkt 3 (Vorgänge beim Brennen) formuliert:

- Brennen

Brennen ist eine mit Flamme und/oder Glut selbstständig ablaufende exotherme Reaktion zwischen einem brennbaren Stoff und Sauerstoff oder Luft.

2.1.2 Gefährdung durch Brand – Seite 7 – 01.06.2013 << >>

Als Oxidationsmittel wird hier demnach nur der Sauerstoff zugelassen, eine Einschränkung, die zwar für die alltägliche Feuerwehrpraxis, nicht jedoch in der betrieblichen Schadensvorsorge, hier insbesondere für die chemische Industrie, toleriert werden kann. Betrachten wir ein einfaches Beispiel, welches die analoge Wirkung auch anderer Oxidationsmittel als Sauerstoff (im ca. 20 %igen Anteil in der Luft) auf einfache Weise belegt:



Reaktion (1) wird die Knallgas-Reaktion, Reaktion (2) die Chlorknallgas-Reaktion genannt. Beide laufen in Konzentrationsbereichen zwischen den Explosionsgrenzen mit erheblicher Rasanz und Zerstörungskraft ab. Reaktion (2) wäre jedoch nach der Definition der DIN 14011 nicht als ein Verbrennungsprozess anzusehen, da die Oxidation nicht mittels Sauerstoff, sondern durch Chlor erfolgt.

Es ist daher einleuchtend, dass ein Oxidationsprozess nicht allein auf den Sauerstoff als Reaktionspartner begrenzt werden darf, wengleich feststeht, dass in der überwiegenden Zahl der hier zu besprechenden Schadenfeuer die Luft, zuweilen auch nur der Sauerstoff, als Oxidationsmittel anzusehen ist.

Brennstoffe

Bei den hier im Zusammenhang mit dem vorbeugenden baulichen Brandschutz zu betrachtenden Brennstoffen handelt es sich zunächst einmal im Wesentlichen um organische Feststoffe, die als Baustoffe im Gebäude Verwendung finden (massiv oder auch

feiner strukturiert aus Holz oder Kunststoffen). Brennbare Flüssigkeiten, deren Dämpfe oder Gase werden als Brennstoffe bzw. im betrieblichen Bereich auch als Reaktionsmedien gelagert und umgesetzt. Es sollten daher auch in dem vorliegenden, thematisch begrenzten Themenkreis möglichst alle als Brennstoff im Sinne des Emmons-Tetraeders auftretenden Substanzgruppen bezüglich des Risikos ihrer Brennbarkeit wenigstens kurz beschrieben werden.

Feste Brennstoffe

Hierbei kann es sich um kompakte, großdimensionierte Teile oder Konstruktionsanteile, um faserig praktisch eindimensional, um flächig zweidimensional aufgebaute Werkstoffe handeln, die strukturiert als textile Gewebe oder auch unstrukturiert planenförmig bzw. folienförmig in, an oder auf der Bausubstanz Verwendung finden bzw. frei von der Bausubstanz als Innenausstattung eingesetzt werden. Zum Schluss sollte der feinste Verteilungsgrad fester Brennstoffe, der Staub, erwähnt werden:

2.1.2 Gefährdung durch Brand – Seite 8 – 01.06.2013 << >>

»Fein zerteilter Feststoff beliebiger Form, Struktur und Dichte unterhalb einer Korngröße von $500 \mu\text{m}^1$ «, welcher sowohl abgelagert als auch aufgewirbelt ein besonderes Brennstoffrisiko darstellt.

Die festen Brennstoffe sind zumeist in der Lage, in zwei unterschiedlichen Reaktionsformen exotherm zu oxidieren:

- in Form einer Festkörperreaktion zu schwelen bzw. zu glimmen,
- in Form einer Gasphasenreaktion unter Flammenbildung »offen« zu brennen.

In vielen Fällen einer Feststoffverbrennung liegen beide genannten Prozessstypen nebeneinander vor, doch können diese auch isoliert voneinander ablaufen (z.B. Holzstaubbrand oder Metallpulverbrand im ersten Fall und der Abbrand von thermoplastischem Kunststoff im zweiten Fall).

Neben den rein morphologischen Aspekten des Verteilungsgrades, der das Verbrennungsverhalten der Feststoffe erheblich beeinflusst, ist außerdem noch entscheidend, ob es sich bei dem betrachteten Material um einen duroplastischen oder einen thermoplastischen Werkstoff handelt, wobei ein besonderes Risiko in der Mischung beider Materialgruppen liegt. Bei der thermischen Belastung eines Gemisches aus Duro- und Thermoplasten kommt es zu dem gefürchteten Docht- oder Gerüsteffekt, wobei das thermisch resistente duroplastische Material die aus den Thermoplasten gebildete Flüssigkeit stützt bzw. aufsaugt, die Oberfläche der Schmelze vergrößert und so einen fackelartigen Abbrand des Gesamtsystems ermöglicht (z.B. Heim- oder Bekleidungstextilien aus Kunstfasern mit Baumwollbeimischungen). In der Abbildung 4 sind die verschiedenen Erscheinungsformen der festen Brennstoffe, geordnet nach ihrem Brandrisiko, schematisch zusammengestellt.

Normen zur anwendungsunabhängigen Bestimmung von brandschutztechnischen Kennwerten für feste brennbare Materialien existieren praktisch nicht, sind auch vom Prinzip her nicht notwendig. Es sind jedoch anwendungsorientierte Bestimmungsmethoden genormt (z.B. als Baustoffe in der DIN 4102), welche über Brennbarkeit und Abbrandgeschwindigkeiten eine Risikoabschätzung der Verwendung unterschiedlicher, hier insbesondere textiler, Werkstoffe Auskunft geben.

Für brennbare Stäube existiert eine Vielzahl von Untersuchungsverfahren, die Auskunft über die Zündfähigkeit sowohl der abgelagerten als auch der aufgewirbelten Mikropartikel geben. Dieses resultiert aus dem erkannt hohen betrieblichen Gefahrenpotential dieser Stoffgruppe. Grundlegende Hinweise gibt die Technische Regel für Betriebssicherheit/Gefahrstoffe »Vermeidung oder Einschränkung gefährlicher explosionsfähiger Atmosphäre« TRBS 2152-Teil 2/TRGS 722.

2.1.2 Gefährdung durch Brand – Seite 9 – 01.06.2013 << >>

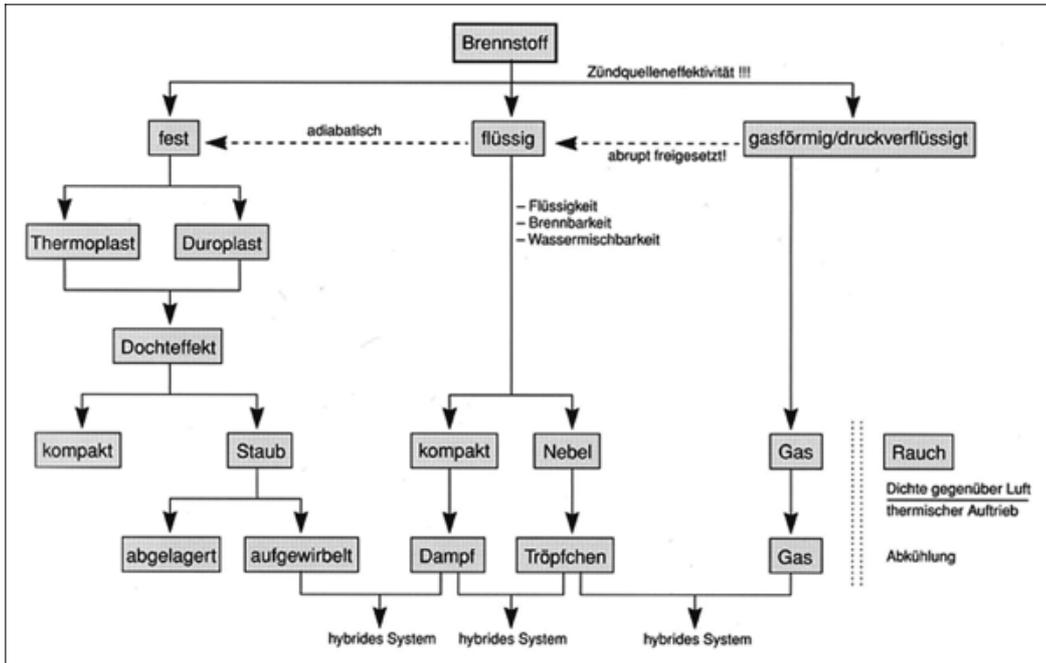


Abb. 4: Erscheinungsform der Brennstoffe sowie das Brandrisiko

Flüssige Brennstoffe

Als flüssige Brennstoffe kommen hier zunächst Heiz- und Kraftstoffe, aber aus dem betrieblichen Umgang auch brennbare Lösemittel in Betracht. Das Brandrisiko bei Lagerung und Umgang resultiert zunächst entscheidend aus der Verdunstungsgeschwindigkeit und der Lage ihres Siedepunktes oder Siedebereichs. Außerdem kann das Entflammungsverhalten durch die Art der angebotenen Zündungsenergie (offene Flammen oder heiße Oberflächen als Zündquellen) erheblich beeinflusst werden.

Wie auch bei den festen Brennstoffen spielen der Verteilungsgrad (kohärentes Flüssigkeitsreservoir im Gebinde oder als massive Lache gegenüber dem fein versprühten Nebel) und die Betriebstemperatur der brennbaren Flüssigkeit eine erhebliche Rolle für die Beurteilung des Zündungsrisikos. Nebel lassen sich durch offene Flammen selbst bei sehr tiefen Temperaturen noch zünden, während an heißen Oberflächen dieses Risiko deutlich geringer gegenüber dem groben Tropfen der der ab rinnenden brennbaren Flüssigkeit wird.

Brandschutztechnische Kennwerte der flüssigen Brennstoffe sind z.B.:

- Flammpunkt, Brennpunkt, Zündpunkt, unterer und oberer Explosionspunkt jeweils als Temperaturangabe (physikalisch korreliert mit der

2.1.2 Gefährdung durch Brand – Seite 10 – 01.06.2013 << >>

Temperaturabhängigkeit des Dampfdrucks der brennbaren Flüssigkeit),

- untere und obere Explosionsgrenze als der jeweiligen Belastungstemperatur zugehörige Dampfkonzentration über der Flüssigkeitsoberfläche.

Für die Risikoszenarien der brennbaren Flüssigkeiten konnte relativ einfach ein Konsens hergestellt werden, da hier keine Diskussionen über Verteilungsgrad und Verwendungsart erforderlich waren. Einzig dem unterschiedlichen Verhalten von kohärenter Flüssigkeit (z.B. Tropfzündpunkt) und versprühtem Nebel ist hier Aufmerksamkeit zu widmen.

Gas- oder dampfförmige Brennstoffe

Diese Brennstoffklasse tritt zusammen mit dem Oxidationsmittel Luft in homogener Phase, der Gasphase, auf. Die einzige Anomalie kann in der Schichtung im freien Luftraum liegen (Stratifizierung), da die meisten brennbaren Gase (Ausnahme: Wasserstoff und Methan) und alle Dämpfe üblicherweise verwandter brennbarer Flüssigkeiten schwerer als Luft sind und ohne Turbulenzen, Ventilationen bzw. Wärmekonvektion sich im betrachteten Raumabschnitt von unten nach oben schichtenförmig lagern.

Als sicherheitstechnische Kennwerte für Gase und Dämpfe stehen zur Beurteilung des Zündungsverhaltens die untere Explosionsgrenze (UEG) bzw. die obere Explosionsgrenze (OEG) und der Gaszündpunkt zur Verfügung.

Die Folgereaktion nach der Zündung

Nach dieser intensiven Behandlung der Zündungssituation und ihrer Effektivität im Sinne des Emmons-Tetraeders muss darüber nachgedacht werden, mit welchen Folgen bei einer derartigen Zündung zu rechnen ist. Wie schon vorhergehend angedeutet, kann es zu zwei verschiedenen Reaktionstypen kommen, je nach der Art und dem Verteilungsgrad des vorliegenden Brennstoffs und seiner – zum Teil daraus resultierenden – Durchmischung oder Durchmischungsmöglichkeit mit dem Oxidationsmittel, welches in den meisten Fällen die Luft bzw. ihr Sauerstoffanteil ist. Befindet sich das System aus Brennstoff und Oxidationsmittel (Luft) bereits vorgemischt im zündfähigen Bereich innerhalb der jeweiligen Zündgrenzen des Systems (zwischen UEG und OEG bezogen auf die Brennstoffkonzentration des zu betrachtenden Raumabschnitts), so kommt es nach dem Einwirken der effektiven Zündquelle zu dem spontanen, überaus raschen, aber einmaligen Reaktionsablauf, welcher in die Gruppe der Explosionen einzuordnen ist.

Wird jedoch erst durch die Einwirkung der Zündenergie ein zündfähiges Gemisch gebildet, oder ist – wie bei der Flamme des Bunsenbrenners –

2.1.2 Gefährdung durch Brand – Seite 11 – 01.06.2013 << >>

die Ausströmgeschwindigkeit des Brenngas-Luft-Gemisches größer als die Rückzündungsgeschwindigkeit und kleiner als die Ablösungsgeschwindigkeit der Flamme, so entsteht ein Kreisprozess aus Zündung und Rückzündung, wobei der Energieüberschuss der Primärzündung in die Aufarbeitung weiteren Brennstoffs einfließt und so die Intensität des primären Verbrennungsprozesses zunächst langsam und dann immer schneller in Form einer Exponentialfunktion wächst, bis sie mit der Endübertemperatur ihr Gleichgewicht mit dem offenen System der Umgebung erreicht hat. Abzuleiten ist dieses typische Verhalten von Verbrennungsprozessen durch ein kombiniertes System radikalischer Reaktionen im prinzipiellen Oxidationsprozess von Kohlenwasserstoffen:



Es ist ersichtlich, dass zum einen innerhalb der Reaktionsfolgen das als Motor des Verbrennungsprozesses zu betrachtende H^\cdot -Radikal neu gebildet wird (unechter Katalysator-Effekt), zum anderen in den ersten beiden Reaktionsschritten aus jeweils einem eingesetzten Radikal zwei neue entstehen (Radikalproliferation). Hierdurch wird eine exponentielle Beschleunigung der Reaktionsgeschwindigkeit erreicht, die sich für den Fortgang des Oxidationsprozesses positiv (bei Energieüberschuss), aber auch negativ bei überdurchschnittlichen Energieverlusten auswirken kann, wobei es im letztgenannten Fall zu einem raschen Erlöschen des Verbrennungsprozesses kommt (s. Abb. 5).

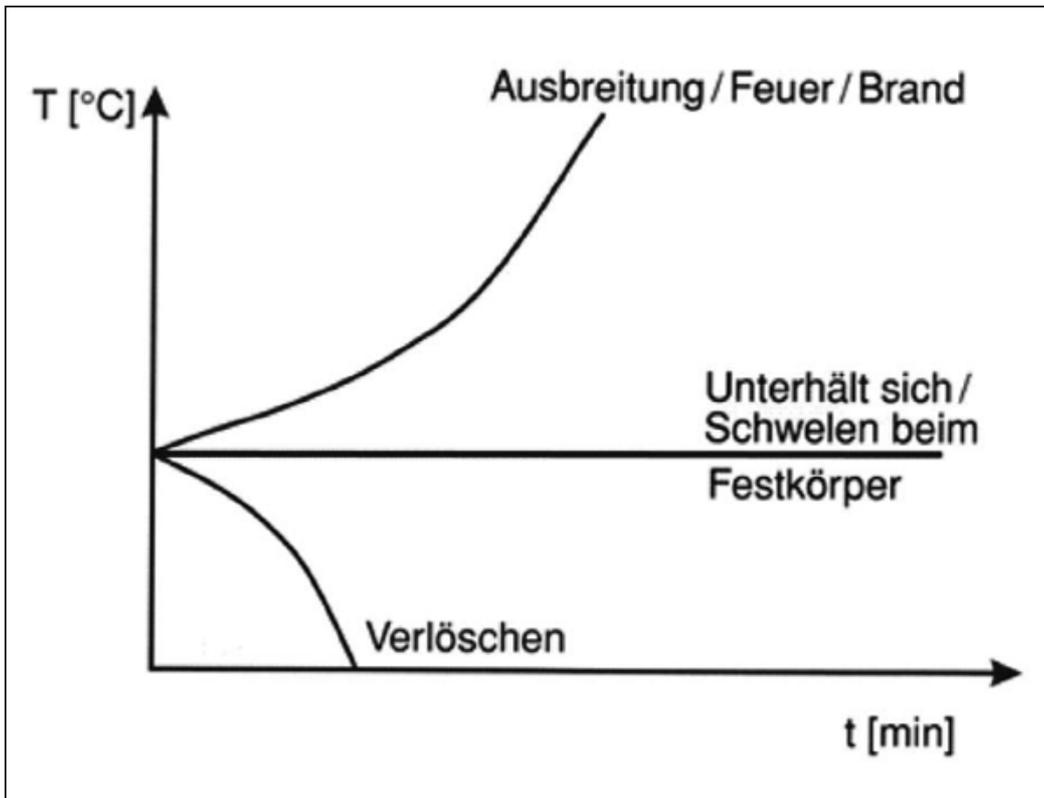


Abb. 5: Schematische Darstellung der Wirkung von Zündung und Rückzündung

Im Folgenden sollen die über ihre Wirkung unterscheidbaren beiden Phänomengruppen der selbstständig ablaufenden exothermen Reaktionen, die Explosionen und die Brände, in ihren verschiedenen Erscheinungsformen kurz dargestellt werden.

2.1.2 Gefährdung durch Brand – Seite 12 – 01.06.2013 << >>

Die Explosionen

Bei den Explosionen handelt es sich um sehr rasch ablaufende Reaktionen, die sich zumeist nur durch einen mehr oder weniger lokal begrenzten »kalten« Schaden an Raumabschlüssen, Sachen oder auch Personen durch Druckeinwirkung zu erkennen geben, wobei es durch Verdämmung des primären Bereichs der Druckentwicklung zum Fortschleudern von Bruchstücken mit erheblicher Splitterwirkung kommen kann. Charakteristisch für explosionsartig ablaufende exotherme Reaktionen im Gebäude sind heraus gesprengte Fenster, zum Teil mit den Rahmen und Maueranschlüssen, nach außen hinaus gedrücktes Gefach, bei Leichtbauweisen die völlige Zerstörung der Konstruktion (s. Abb. 6).



Abb. 6: Zerstörungsbild nach einer Gas-Explosion

Die Explosion ist zunächst ein einmalig ablaufendes Ereignis, das jedoch durchaus in der Lage ist, ähnliche Folgereaktionen auszulösen (z.B. durch weitere Aufwirbelung zündfähigen Staubes). Man unterscheidet insbesondere aus praktischen Gründen nach dem Ursprung und den räumlichen Gegebenheiten des Ereignisses:

- die Sprengexplosion im eng begrenzten, verdämmenden Raum,
- die Raumexplosion im abgeschlossenen Raum (Rohrstrecke, Reaktor oder auch innerhalb eines Wohnbereichs),
- die atmosphärische Explosion in räumlich unbegrenzter Umgebung mit ungehinderter Ausbreitung.

Das Ereignis selbst kann nach Strehlow/Baker² wie folgt beschrieben werden:

»Im Allgemeinen spricht man davon, dass eine Explosion in der Atmosphäre stattgefunden hat, wenn so viel Energie in einer ausreichend

2.1.2 Gefährdung durch Brand – Seite 13 – 01.06.2013 << >>

kleinen Zeit in einem ausreichend kleinen Volumen freigesetzt wurde, dass eine Druckwelle mit endlicher Amplitude entsteht, die sich von der Quelle weg ausbreitet. Diese Energie kann ursprünglich in dem System in verschiedener Form gespeichert sein, z.B. als nukleare, chemische oder elektrische Energie oder auch Druckenergie. Die Freisetzung wird so lange nicht als explosiv bezeichnet, wie sie nicht schnell und konzentriert genug erfolgt, so dass eine Druckwelle entsteht, die man hören kann.«
Die grundlegenden Begriffe und Definitionen finden sich in der Technische Regel für Betriebssicherheit TRBS »Gefährliche explosionsfähige Atmosphäre – Allgemeines« (TRBS 2152) im Kapitel 2 Begriffsbestimmungen. Hiernach ist wie folgt definiert:

- Ein explosionsfähiges Gemisch ist ein Gemisch aus brennbaren Gasen, Dämpfen, Nebeln oder Stäuben, in dem sich ein Verbrennungsvorgang nach erfolgter Zündung auf das gesamte unverbrannte Gemisch überträgt.
- Eine explosionsfähige Atmosphäre ist ein Gemisch aus Luft und brennbaren Gasen, Dämpfen, Nebeln oder Stäuben unter atmosphärischen Bedingungen, in dem sich ein Verbrennungsvorgang nach erfolgter Entzündung auf das gesamte unverbrannte Gemisch überträgt. Als atmosphärische Bedingungen im Sinne der TRBS 2152 gelten Gesamtdrücke von 0,8 bar bis 1,1 bar und Gemischtemperaturen von -20 °C bis $+60\text{ °C}$.
- Eine gefährliche explosionsfähige Atmosphäre ist eine explosionsfähige Atmosphäre, die in einer solchen Menge (gefährdrohende Menge) auftritt, dass besondere Schutzmaßnahmen für die Aufrechterhaltung des Schutzes von Sicherheit und Gesundheit erforderlich werden. Anzumerken ist, dass mehr als 10 Liter explosionsfähige Atmosphäre

in Form eines zusammenhängenden Volumens unabhängig von der Gesamtraumgröße als gefährlich angesehen werden.

- Eine Explosion im Sinne dieser TRBS 2152 ist eine plötzliche Oxidationsreaktion mit Anstieg der Temperatur, des Druckes oder beidem gleichzeitig.
- Unter Deflagration ist eine Explosion zu verstehen, die sich mit Unterschallgeschwindigkeit fortpflanzt,
- Unter Detonation ist eine Explosion zu verstehen, die sich mit Überschallgeschwindigkeit fortpflanzt; sie ist gekennzeichnet durch eine Stoßwelle.

Anzuwenden sind diese Definitionen in explosionsgefährdeten Bereichen:

- Ein explosionsgefährdeter Bereich ist ein Bereich, in dem gefährliche explosionsfähige Atmosphäre auftreten kann. Ein Bereich, in dem explosionsfähige Atmosphäre nicht in einer solchen Menge zu erwarten

2.1.2 Gefährdung durch Brand – Seite 14 – 01.06.2013 << >>

ist, dass besondere Schutzmaßnahmen erforderlich werden, gilt nicht als explosionsgefährdeter Bereich.

Die chemische Explosion als Gruppenbegriff umfasst Zerfall der Oxidationsreaktionen vorgemischter Brennstoff-/Oxidationsmittel-Systeme, in denen sich nach der Zündung die Flamme (Reaktionszone) selbstständig ausbreitet, ohne dass eine weitere Energie- oder Materialzufuhr erforderlich ist.

Hiervon im Prinzip zu unterscheiden sind die physikalischen Explosionen, die vom gesamten Erscheinungsbild sehr summarisch unter dem Begriff des Behälterzerknalls zusammengefasst werden können und zumeist ihre Druckwirkung aus der Änderung des Aggregatzustandes eines Mediums beziehen, wie es z.B. vom trivialen Beispiel des Siedeverzugs aus der Laboratoriums-Praxis bekannt sein dürfte.

Dass eine derartige schlagartige Dampffreisetzung Erhebliches an Arbeit bzw. Zerstörungskraft freisetzen kann, soll am Beispiel der Fettexplosion (s. Abb. 7) erläutert werden. Eine Fettexplosion durch Siedeverzug tritt auf, wenn fälschlicherweise versucht wird, einen Fettbrand mit Wasser oder Ähnlichem zu löschen. Da brennendes Fett oder Öl bereits bei seiner Entzündung mehrere 100 °C heiß ist, verdampft zugegebenes Wasser schlagartig. Weil das Wasser jedoch einige Sekundenbruchteile benötigt, um im heißen Fett zu verdampfen, sinkt es vorher noch in dieses ein. Durch die explosionsartige Verdampfung wird das brennende Fett mit dem Wasserdampf aus dem Behälter gerissen, mit für den Löschenden ein sehr gefährliches Risiko und die Umgebung meist verheerenden Auswirkungen.



Abb. 7: Darstellung einer Fettexplosion durch Siedeverzug

Die Fettexplosion hat, wenn sie sich, z.B. im Freien, frei entfalten kann, die charakteristische Form eines Pilzes oder einer Säule aus brennender Flüssigkeit. Das Phänomen einer Fettexplosion kann natürlich auch z.B. bei erhitztem Wachs oder Ähnlichem auftreten.

In der schematischen Zusammenfassung der Abbildung 8 sind die differenzierbaren Phänomene chemischer und physikalischer Explosionen zusammengestellt, wobei auch die im folgenden Abschnitt zunächst prinzipiell zu behandelnde Phänomengruppe der Brände eingeordnet wurde

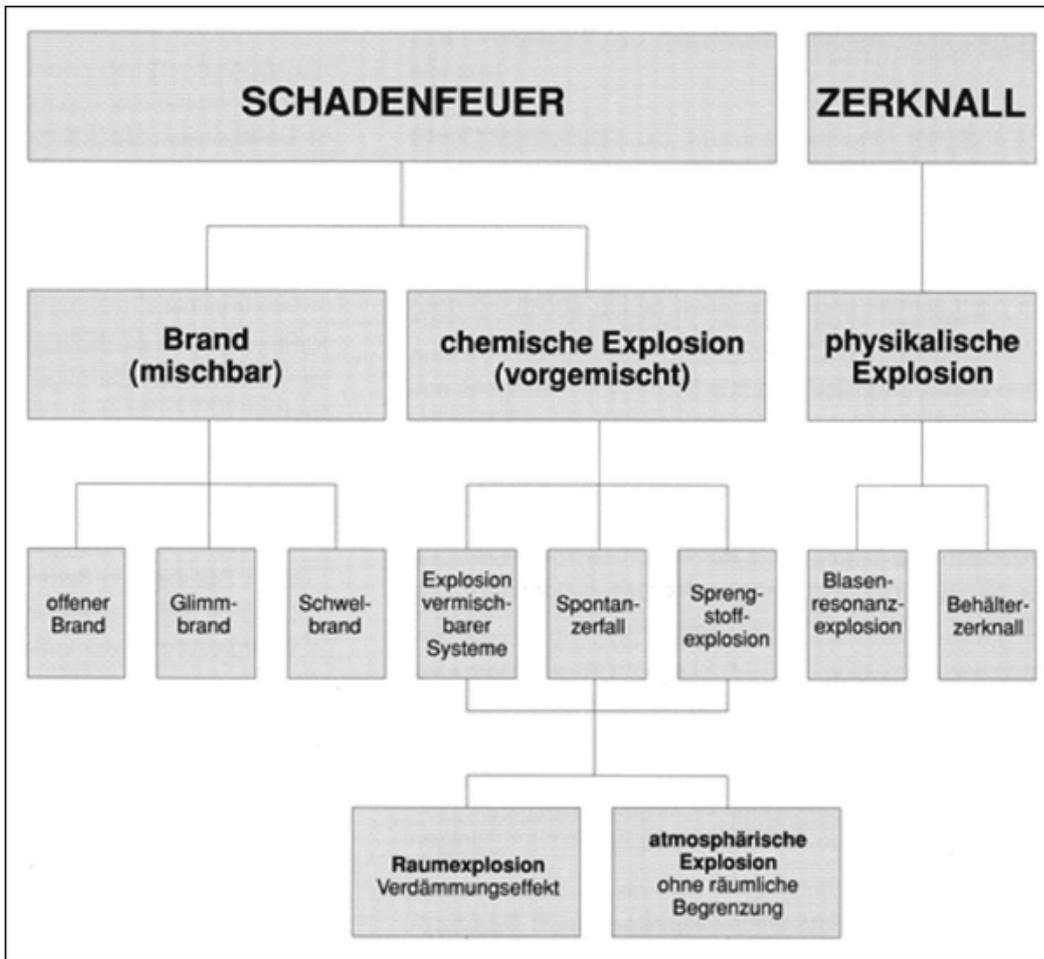


Abb. 8: Differenzierung zwischen Brand und Explosion

Die Brände

Die Brände (Feuer) in ihren unterschiedlichen Ausprägungen können als die langsamen leiblichen Geschwister der schnellen Phänomengruppe der Explosionen angesehen werden. Wie die Explosionen (mit Ausnahme der Reaktionen resultierend aus einem Spontanzerfall) erfordern sie zur Einleitung der Reaktionsketten die durch das Zündungs-Tetraeder nach Emmons bildhaft sehr einprägsam beschriebene räumliche und zeitliche Koinzidenz von Brennstoff, Oxidationsmittel und Zündquelle. Im Gegensatz zu den chemischen Explosionen ist hier jedoch die Vormischung von Brennstoff und Oxidationsmittel (üblicherweise der Raumluft) innerhalb der Zündgrenzen nicht notwendig, es muss nur eine Mischbarkeit durch die Primäreinwirkung der Zündquelle oder sekundär durch die Primärzündung gegeben sein.

Wesentlich für die differenzierende Beurteilung der unterschiedlichen Phänomene des Feuers in seiner »langsamen Form«, dem Brand, ist, dass er sich in zwei Materiephasen manifestieren kann, die durchaus isoliert auftreten können:

2.1.2 Gefährdung durch Brand – Seite 16 – 01.06.2013 << >>

- dem Festkörperbrand (Glutbrand), wobei der Brennstoff als Festphase, das Oxidationsmittel (Luft) als gasförmige Komponente vorliegt,
- dem Gasphasenbrand (Flammenbrand), bei welchem sowohl der thermisch aufbereitete oder als solcher schon vorliegende Brennstoff als auch das Oxidationsmittel »Luft« sich als homogene Phase im Gasraum leicht beweglich vermischen und miteinander reagieren können.

Der erhebliche Unterschied in der Reaktionsgeschwindigkeit zwischen beiden Oxidationstypen lässt sich etwas trivial, jedoch einprägsam am Beispiel des Bratwurstgrillens demonstrieren:

Wird als Bratenenergie nur Wärme Konvektion bzw. Strahlung der glimmenden Holzkohle angeboten, so kann das Zubereitungsgeschehen harmonisch und kontrolliert ablaufen. Wird jedoch durch ausspritzendes Fett in die Glut diese in einen Flammenbrand überführt, so ist Eile geboten, um das Röstgut vor dem nun sehr rasch voranschreitenden Verbrennungsprozess zu retten.

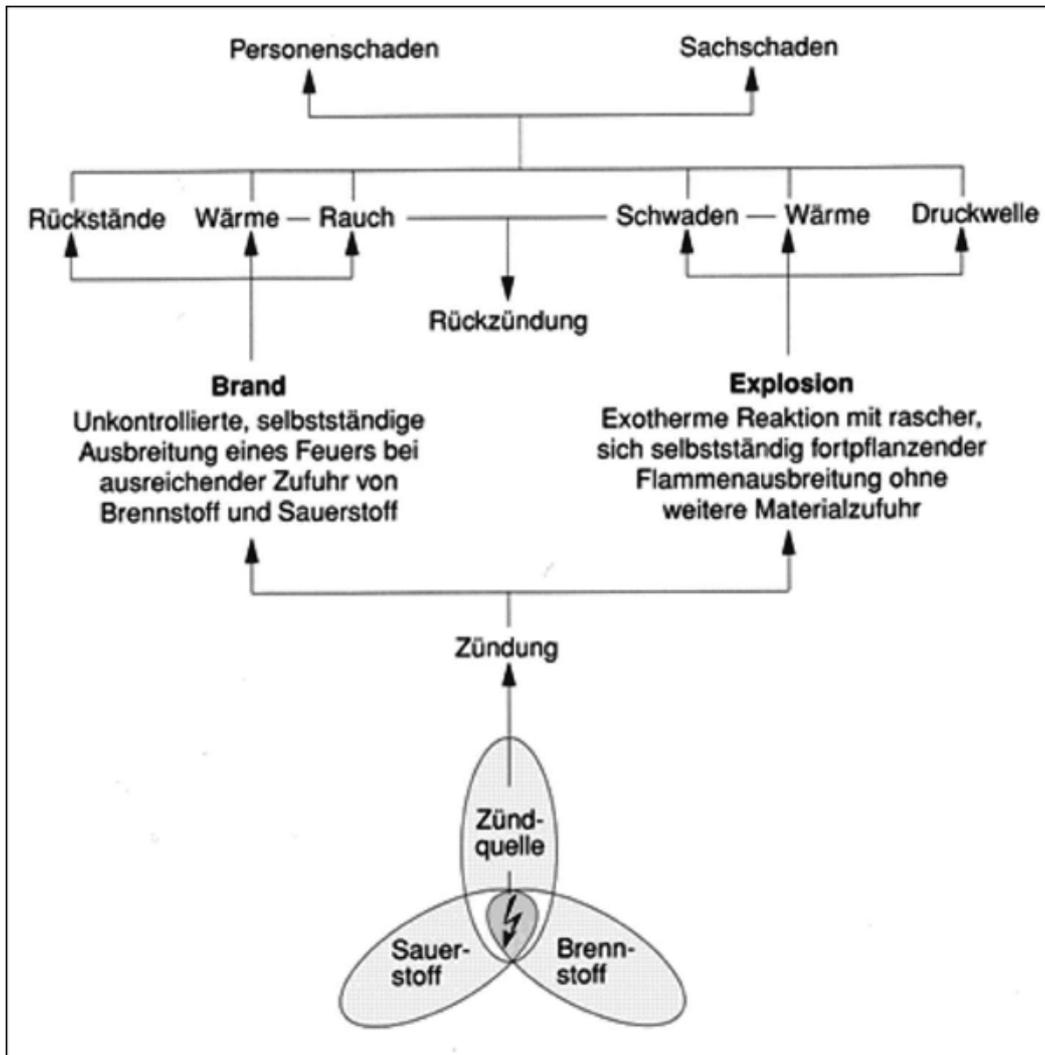


Abb. 9: Unterschiedliche Auswirkungen bei Brand und Explosionen

Prinzipiell gilt diese Unterscheidung zwischen Ein- und Mehrphasigkeit auch für die Brennstoff-Oxidationsmittel-Gemische bei Explosionen, doch ist in diesem Fall wegen der erheblich erhöhten Reaktionsgeschwindigkeit und phänomenologischer Unterschiede (Druckaufbau) makroskopisch für die hier vorliegenden Betrachtungen dieser Unterschied unbeachtlich (s. Abb. 9).

Nach diesem Exkurs in die Theorie bzw. deskriptive Phänomenologie von Explosionen und Brand (gesamt Brennen/Feuer) muss nun zurückgegangen werden auf die hier wesentliche Ausgangsfrage:

Was ist ein Brand?

Es handelt sich um einen Verbrennungsprozess, also eine chemische Veränderung bzw. eine Reaktion zwischen Brennstoff und Oxidationsmittel (Oxidationsprozess), die unter Wärmebildung (exotherm) und freiwillig (selbstständig) abläuft, wobei eine Lichtemission (Flamme oder Glut) sichtbar wird. Die Begriffe »brennen« und »Feuer« beschreiben verbal die Gruppe derartiger Vorgänge. Diese Reaktionen können einen beabsichtigten Nutzen oder einen Schaden hervorrufen, wobei der »Nutzen« eines beabsichtigten Inbrandsetzens eines gut versicherten Objektes durch den Versicherungsnehmer hier nicht zur Diskussion steht. Auf die Janusköpfigkeit der Verwendung oder besser der Wirkung des Prometheus-Geschenkes »Feuer« wurde einleitend bereits ausführlich hingewiesen, so dass die Bifunktionalität als Nutzfeuer – Schadensfeuer hier nicht mehr überrascht. Wie lassen sich nun diese beiden Begriffe in ihrer juristischen Auswirkung ausreichend genau differenzieren?

Das Feuer (Verbrennung) als exothermer Oxidationsprozess, der unter Leuchterscheinung abläuft, muss sich, um als Schadensfeuer und damit als Brand aufzutreten, unkontrolliert und selbstständig ausbreiten und -eventuell durch das unbeabsichtigte Verlassen seiner Ausgangsstätte (des bestimmungsmäßigen Herdes) – einen Schaden anrichten, der nun entweder versicherungsrechtlich oder strafrechtlich zu würdigen ist. In der Abbildung 10 wird die vorhergehend ausgeführte Definitionsfolge noch einmal schematisch dargestellt.

Wie schon einleitend dargelegt wurde, können die Feststoffbrände sowohl als Festkörper- als auch als Gasphasenoxidationsreaktion ablaufen. In vielen Fällen des Feststoffbrandes treten beide Reaktionstypen gemeinsam auf. Die Flüssigkeitsfeuer und auch Gas- oder Dampffeuer laufen natürlich prinzipiell nur in der Gasphase ab.

Versucht man nun den Gesamtablauf eines Feststoff-Feuers schematisch gegliedert zu betrachten, so ergibt sich die in Abbildung 11 dargestellte Unterteilung in folgende differenzierbare Phasen:

Phase 1:	Zündung (bei Erfüllung der Bedingungen des Emmons-Tetraeders), 2.1.2 Gefährdung durch Brand – Seite 18 – 01.06.2013 <<>>
----------	---

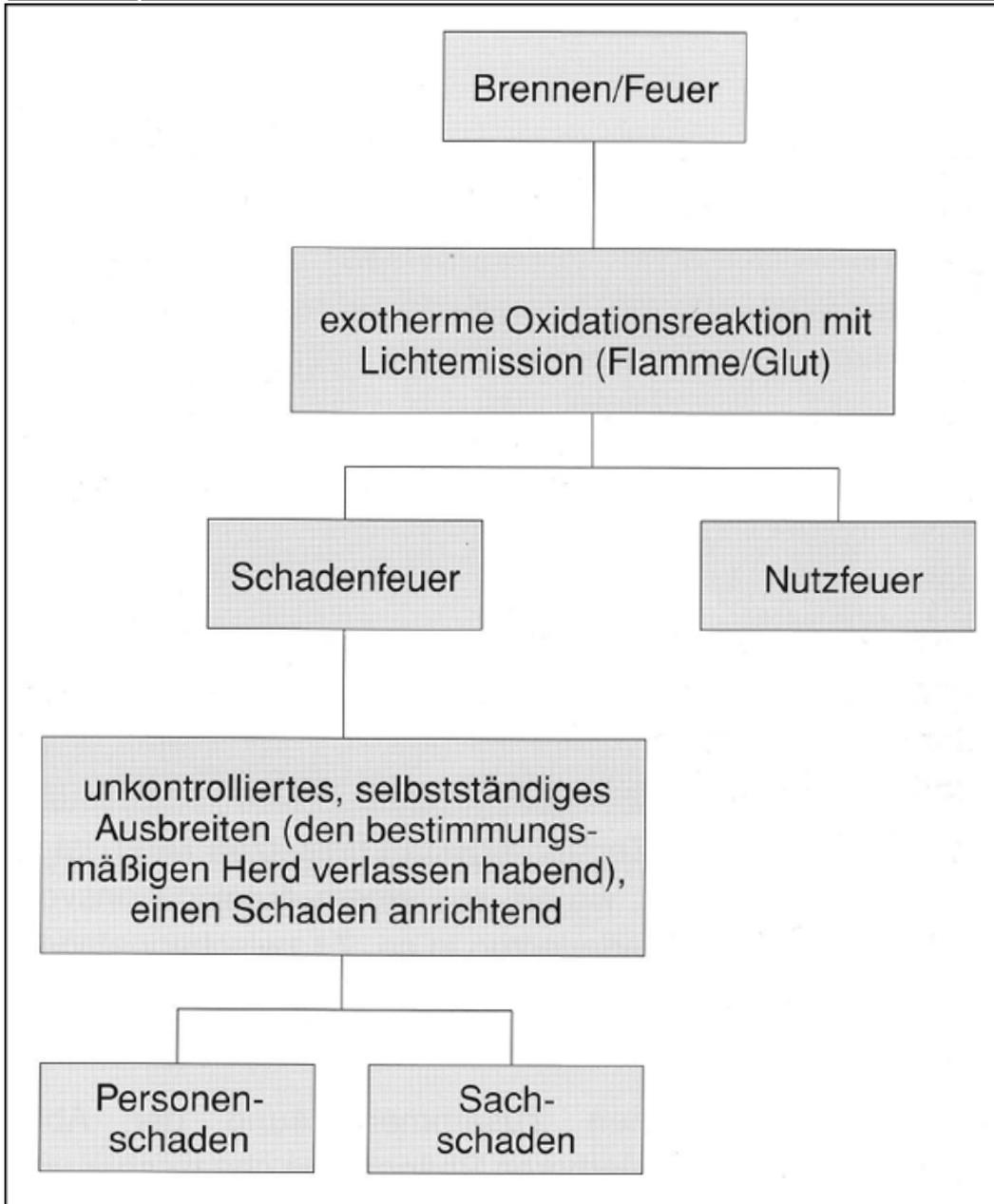


Abb. 10: Definition Schadenfeuer und Nutzfeuer

Phase 2:	Schwelen/Glimmen (praktisch reine Festkörper-Oxidationsreaktion, ventilationsgesteuert),
----------	--

Phase 3: Feuerüberschlag (flash-over mit dem Übergang der Oxidationsreaktion von der Feststoffphase in die Gasphase und erheblicher Geschwindigkeitssteigerung des Abbrandes),

Phase 2: Schwelen/Glimmen (praktisch reine Festkörper-Oxidationsreaktion, ventilationsgesteuert),

Phase 4: Vollbrand,

Phase 5: Abklingender Brand.

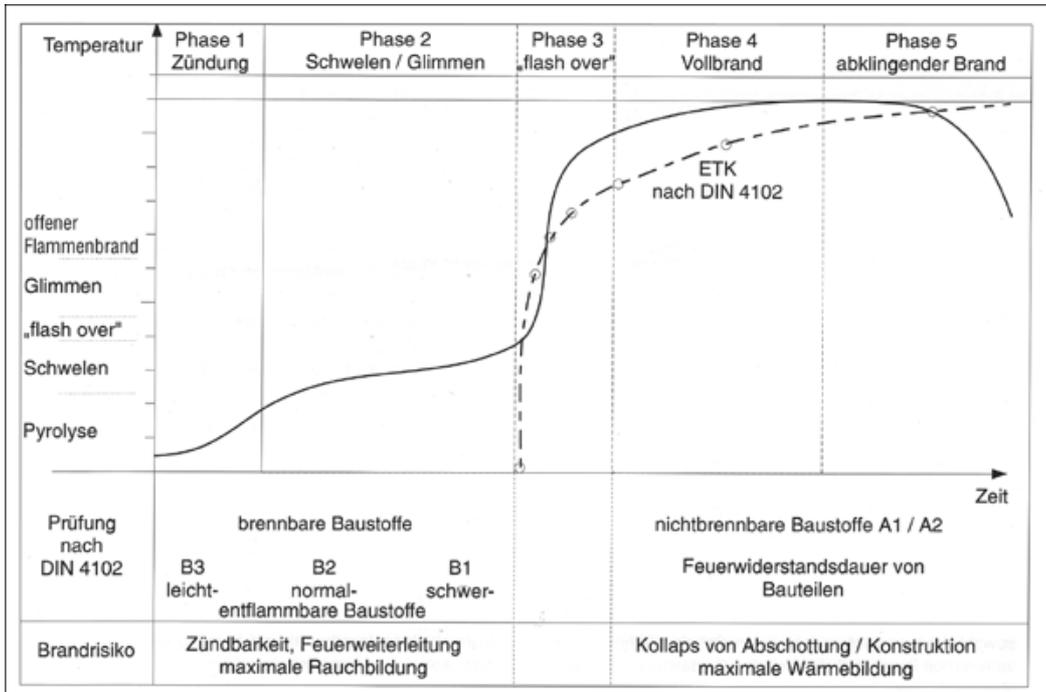


Abb. 11: Schematischer Gesamtverlauf eines Feststoff-Feuers

Weitere Definitionen befinden sich in DIN 14011 »Begriffe aus dem Feuerwehrwesen«. Die Begriffe und Definitionen dieser Norm sind zur praxisnahen Verwendung im Feuerwehrwesen bestimmt. Sie sind in möglichst einfacher Weise – teilweise unter Verzicht auf wissenschaftliche Exaktheit – festgelegt. So sind zum Beispiel die Definitionen bei den Vorgängen beim Brennen auf Oxydationen mit Sauerstoff beschränkt. Ferner sind zum Beispiel explosionsfähige Stoffe und zum Selbsterfall neigende Stoffe nicht behandelt.

Die Abbildung 11 demonstriert diesen prinzipiellen Ablauf schematisiert, wobei die Zeitachse variabel gedacht sein muss und auch nicht alle Pha-

sen in der hier genannten Reihenfolge bei jedem Feststoff-Feuer auftreten müssen. Der jeweilige Einzelfall richtet sich nach z.B. Art und Verteilungsgrad des jeweiligen festen Brennstoffs, Geometrie und Ventilation des Brandraums, Intensität der Primärzündung etc.

In der Abbildung 12 werden die Temperatur-Zeit-Abläufe der verschiedenen Brennstoffe fest, flüssig und gasförmig in ihren typischen Abbrandformen schematisch gegenübergestellt, wobei hier nur die prinzipiellen Unterschiede herausgearbeitet werden sollten und Mischformen unberücksichtigt bleiben mussten. Ganz links im Diagramm sind die verschiedenen Formen der Explosionen als Kurzzeitreaktionen eingezeichnet. Verlauf A soll den Verlauf von Flüssigkeitsfeuern symbolisieren, die ohne Schwelphase oder Glimmphase gleich nach dem effektiven Zünden in den flash-over-Verlauf eintreten. Als Ausnahme wäre hier der Ablauf eines Leichtmetallfeuers zu nennen, da zum einen der Brennstoff »Leichtmetall« in Form von Aluminiumlegierungen bei ca. 700 °C schmilzt (Flüssigkeit), zum anderen die Oxidation dieser Stoffgruppe nur in der Festphase in Form eines sehr heißen Glutbrandes abläuft.

Im Verlauf B ist der Normalabbrand von kompakten Feststoffen nachgezeichnet mit deutlicher Ausprägung der vorhergehend beschriebenen Phasen Schwelen/Glimmen, flash-over und Vollbrand, wobei alle diese

Phasen unterschiedlich rasch durchlaufen werden können. Verlauf C soll den reinen Schwelbrand/Glimmbrand modellmäßig darstellen, bei welchem die Endübertemperatur gegenüber den anderen Feuerarten relativ geringer ausfällt, hier jedoch die Feuerfolgeerscheinung Rauch als erhebliches Risiko im Vordergrund steht.

Die beiden Strichpunkt-Kurven geben schon an dieser Stelle einen Hinweis auf die normenmäßige Feuerbelastung von Bauteilen zur Bestimmung ihrer Feuerwiderstandsdauer, und zwar nach DIN 4102-2 »Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen; Bauteile, Begriffe, Anforderungen und Prüfungen« als Einheitstemperaturzeitkurve (ETK), durch welche in der schematischen Darstellung des Feststoff-Feuers eine Simulation von der Phase 3 (flash-over) und Phase 4 (Vollbrandsituation) in der Temperaturbelastung des Versuchsofens vorgenommen wird.

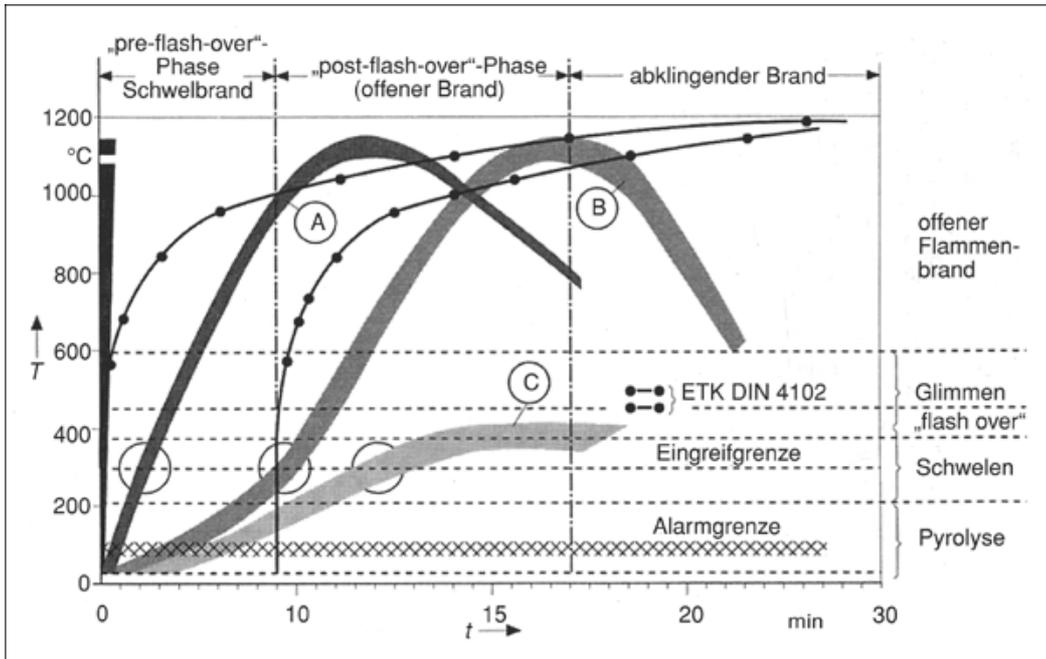


Abb. 12: Temperatur-Zeitverläufe verschiedener Reaktionen (Gas – flüssig – fest)

Bearbeitungsdatum: Dezember 2016

Fußnoten

¹ GESTIS-STAU-EX – Datenbank: Brenn- und Explosionskenngrößen von Stäuben

² Strehlow/Baker, NASA CR 134 779, 1975