



<u>Veranstaltung:</u>	F-III
<u>Ausbildungseinheit:</u>	Brennen und Löschen
<u>Thema:</u>	
<u>Ausgabe:</u>	28.11.2016
<u>Zuständig:</u>	Abteilung 3
<u>Bearbeitet von:</u>	Catherina Volk Martin Reitz
<u>Literaturhinweis:</u>	Brandlehre, Rempe/Rodewald Feuerlöschmittel, Alfons Rempe Verbrennen und Löschen, Rotes Heft Nr. 1 Chemie, Grundwissen für den Feuerwehrmann, Rotes Heft Nr. 59 DIN 14011 „Begriffe aus dem Feuerwehrwesen“

Inhalt

1	Einleitung	3
2	Begriffe (Wiederholung)	3
3	Voraussetzungen des Brennens.....	4
3.1	Stoffliche Voraussetzungen.....	4
3.2	Energetische Voraussetzungen	4
4	Brennbare Stoffe.....	5
4.1	Brandklassen nach EN 2.....	5
4.1.1	Brandklasse A	5
4.1.2	Brandklasse B	6
4.1.3	Brandklasse C	7
4.1.4	Brandklasse D	8
4.1.5	Brandklasse F	8
4.2	Brandkenngößen	9
4.2.1	Entzündbarkeit	9
4.2.2	Brennbarkeit.....	10
4.2.3	Brandtemperatur	10
4.2.4	Abbrandrate / Verbrennungsgeschwindigkeit.....	10
4.3	Verbrennungswärme	11
5	Sauerstoff	11
5.1	Reduzierung der Sauerstoffzufuhr	12
5.2	Erhöhung der Sauerstoffzufuhr	12
6	Richtiges Mengenverhältnis.....	13
7	Zündenergie	15
7.1	Temperaturklassen	16
7.2	Selbstentzündung	17
7.2.1	Voraussetzungen	17
7.2.2	Beispiele	17
8	Katalysator	17
9	Phänomene der schnellen Brandausbreitung	19
9.1	Explosion	19
9.2	Rauchdurchzündung (Rollover).....	19
9.3	Raumdurchzündung (Flashover).....	20
9.4	Rauchexplosion (Backdraft)	20

10	Löschverfahren	22
10.1	Abkühlen	22
10.2	Ersticken	23
10.2.1	Verdünnen.....	23
10.2.2	Abmagern.....	24
10.2.3	Trennen.....	24
10.3	Hemmen der Reaktion	24
11	Löschmittel.....	25
11.1	Löschmittel Wasser	25
11.1.1	Löschwirkung	25
11.1.2	Anwendung	25
11.1.3	Anwendungsgrenzen	27
11.2	Löschmittel Schaum	29
11.2.1	Löschwirkung	29
11.2.2	Anwendung	31
11.2.3	Anwendungsgrenzen	34
11.3	Löschmittel Pulver	35
11.3.1	Löschwirkung	35
11.3.2	Anwendung	36
11.3.3	Anwendungsgrenzen	37
11.4	Löschmittel Kohlenstoffdioxid	38
11.4.1	Löschwirkung	38
11.4.2	Anwendung	38
11.4.3	Anwendungsgrenzen	39
11.5	Fettbrandlöschmittel	40
11.5.1	Löschwirkung	40
11.5.2	Anwendung	40
11.5.3	Anwendungsgrenzen	40
11.6	Sonstige Löschmittel	41
11.6.1	Inertgase	41
11.6.2	Halone.....	41
11.6.3	Chemische Löschgase	41
12	Quellenverzeichnis	42

1 Einleitung

In Deutschland verursachen jährlich ca. 200.000 Brände Schäden in Höhe von 6 Milliarden Euro und fordern ca. 600 Menschenleben. Hinzu kommen ca. 6000 schwer und 6000 leicht Verletzte. Aus diesem Grund ist eine professionelle Vorbeugung und Bekämpfung von Bränden aus moralischer und volkswirtschaftlicher Sicht eine der wichtigsten Aufgaben der Feuerwehren.

Für eine qualitativ hochwertige Arbeit im vorbeugenden und abwehrenden Brandschutz ist das Wissen über Brandentstehung, Brandverlauf und Brandbekämpfung ein elementar wichtiger Bestandteil.

2 Begriffe (Wiederholung)

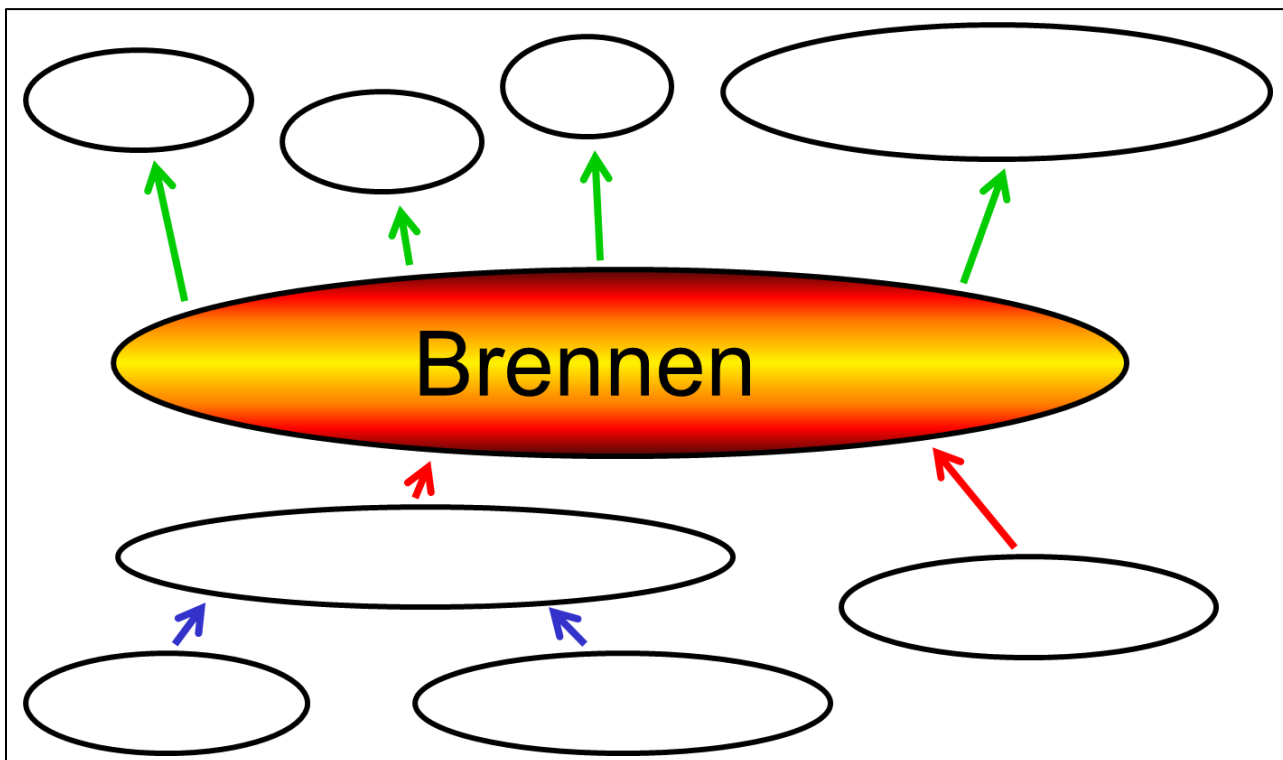


Abb. 1: Merkmale und Voraussetzungen des Brennens

Je nach Aggregatzustand und Zusammensetzung verbrennen Stoffe mit unterschiedlichen sichtbaren Erscheinungen.

Die Glut bezeichnet den Energiezustand eines festen oder durch Erwärmung flüssig gewordenen Stoffes, d. h. die von ihm ausgehende Wärmestrahlung. Glut alleine entsteht bei festen, nicht weiter zersetzbaren brennbaren Stoffen. Beispiele hierfür sind künstlich entgaste Stoffe wie Holzkohle oder Koks, aber auch Metalle wie Eisen, Aluminium oder Magnesium.

Reine Flammenbrände stellen die Brände brennbarer Gase und Flüssigkeiten dar. Bei brennbaren Flüssigkeiten brennt nicht die Flüssigkeit selbst, sondern es brennen die Dämpfe oberhalb der Flüssigkeit.

Feste und zersetzliche brennbare Stoffe verbrennen mit Flamme und Glut.

Hierbei entsteht die Glut wie bereits oben beschrieben, die Flamme entsteht durch die bei der thermischen Zersetzung entstehenden Gase und Dämpfe.

Ein gutes Beispiel hierfür stellt das Holz dar, das zu einem großen Teil aus Kohlenstoff besteht. Wird Holz erwärmt entweicht zunächst Wasserdampf. Bei weiterem Temperaturanstieg läuft ein Schwelvorgang ab, bei dem zahlreiche Substanzen entstehen. Diese Substanzen, wie z. B. Holzgas, brennen unter gelblicher Flammenbildung ab.

Die Voraussetzungen zum Starten und zur Aufrechterhaltung einer Verbrennung werden im Folgenden weiter behandelt.

3 Voraussetzungen des Brennens

Die Voraussetzungen der Verbrennung können in zwei Gruppen unterteilt werden: **Stoffliche** und **energetische** Voraussetzungen.

3.1 Stoffliche Voraussetzungen

Brennbarer Stoff: Die Verbrennung kann nur ablaufen, wenn genügend brennbarer Stoff in einer für die Verbrennung geeigneten Form vorhanden ist.

Sauerstoff: Muss als Oxidationsmittel der Verbrennung in ausreichender Konzentration vorhanden sein.

Mengenverhältnis: Brennbarer Stoff und Sauerstoff können nur miteinander reagieren, wenn sie in Kontakt stehen und in einem günstigen Mengenverhältnis vorliegen. Das Mengenverhältnis wird vom Brennstoff bestimmt und stellt ein Konzentrationsintervall dar.

3.2 Energetische Voraussetzungen

Die energetischen Voraussetzungen betreffen die Einleitung und die Unterhaltung der Verbrennung.

Zündenergie (Zündtemperatur)

Um eine Verbrennungsreaktion zu starten, bedarf es eines energetischen Anstoßes, d. h. es muss Zündenergie zugeführt werden. Zur Abschätzung der notwendigen Energie gibt man mitunter auch die Temperatur an, auf die das Gemisch aus brennbarem Stoff und Sauerstoff zur Einleitung des Brennens gebracht werden muss (Zündtemperatur).

Mindestverbrennungstemperatur (MVT)

Ist eine Verbrennung eingeleitet, so ist eine Mindestenergie notwendig, damit die Verbrennung selbstständig weiterläuft. Zur Abschätzung dieser Energie gibt man die niedrigste Temperatur des reagierenden Gemisches an, bei der das Brennen gerade noch möglich ist (Mindestverbrennungstemperatur).

Katalysator

Katalysatoren haben einen entscheidenden Einfluss auf die energetischen Abläufe der Verbrennungsreaktion. Sie wirken in erster Linie, indem sie die zum Start der Verbrennung notwendige Energie reduzieren.

4 Brennbare Stoffe

4.1 Brandklassen nach EN 2

Die Unterschiede in Form und Zustand der brennbaren Stoffe führt zur Einteilung in **Brandklassen**. Die Brandklasseneinteilung ist eine verhältnismäßig grobe Klassifizierung von Stoffen, die im Wesentlichen das gleiche Brandverhalten zeigen. Sie dient dazu, bestimmten Bränden geeignete Löschmittel zuzuordnen zu können.

4.1.1 Brandklasse A

Zu dieser Brandklasse gehören alle Brände von festen Stoffen, hauptsächlich organischer Natur, die normalerweise unter Glutbildung verbrennen. Das Brandverhalten hängt stark von dem Verhältnis der Oberfläche zur Masse ab.

Bei **festen brennbaren Stoffen** bestimmt die Größe der Oberfläche des brennbaren Stoffes, die mit Luftsauerstoff in Kontakt kommen kann, die Entzündbarkeit und Brennbarkeit (**Kontaktverhältnis**). Diese Oberfläche ist umso größer, je größer der **Zerteilungsgrad** des Materials ist.

Feinst verteilte, feste brennbare Stoffe (z. B. Stäube) sind bezüglich Entzündbarkeit und Verbrennungsgeschwindigkeit vergleichbar mit dampfbildenden und gasförmigen Stoffen.

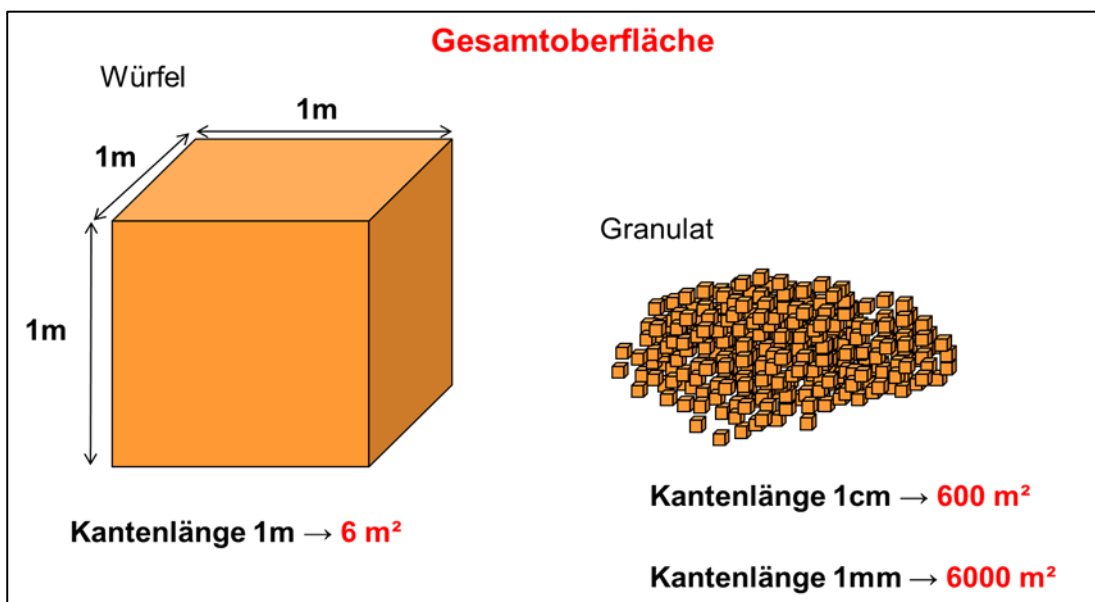


Abb. 2: Veränderung der Gesamtoberfläche in Abhängigkeit vom Zerteilungsgrad

4.1.1.1 Holz

Voraussetzung für die Entzündung von Holz ist eine thermische Aufbereitung, bei der in der ersten Phase Wasserdampf entweicht. Bei weiterem Temperaturanstieg läuft ein Schwelvorgang ab, bei dem zahlreiche Substanzen entstehen wie z. B. Kohlenstoffmonoxid, Kohlenstoffdioxid, Methan und Wasserstoff.

Diese Substanzen brennen unter gelblicher Flammenbildung und geben dabei so viel Wärme ab, dass die übriggebliebene Holzkohle in Brand gesetzt wird.

Wenn die gasförmigen Stoffe verbrannt sind, gibt es keine Flammenbildung mehr und es bleibt nur noch der Glutbrand der Holzkohle übrig.

Die Zündtemperatur liegt je nach Holzart bei 250 °C bis 340 °C. Die Verbrennungstemperatur liegt bei etwa 1.000 °C.

4.1.1.2 Kunststoffe

Mit dem Sammelbegriff Kunststoffe werden verschiedene, künstlich hergestellte, organische Stoffe bezeichnet, die wie Naturstoffe im Wesentlichen Kohlenstoff, Wasserstoff, Sauerstoff und Stickstoff enthalten und aus großen Molekülen (Makromolekülen) bestehen.

Eine Einordnung von Kunststoffen kann sich an den physikalischen und insbesondere den thermischen Eigenschaften orientieren.

Danach werden die folgenden Gruppen unterschieden:

Thermoplaste (bei Erwärmung plastisch und verformbar)

Duroplaste (hart spröde und nicht verformbar)

Elastomere (gummielastisch und quellfähig)

Nachfolgende Eigenschaften vieler Kunststoffe können im Brandfall das Schadenausmaß nachteilig beeinflussen:

- niedrige Erweichungs- und Schmelztemperaturen
- Schmelzen, Abtropfen, Abfließen, Lachenbildung
- brennendes Abtropfen
- niedrige Entflammungstemperatur, d. h. leichte Brennbarkeit
- hohe Verbrennungswärmen (Heizwert)
- starke Rußbildung
- Bildung korrosiver oder toxischer Gase

Achtung: Viele Kunststoffe sind aufgrund ihrer wasserabweisenden und thermoplastischen Eigenschaften eher in die **Brandklasse B** einzuordnen. Für Brände dieser Kunststoffe zeigt das Löschmittel Schaum bzw. eine Wasser-Schaummittellösung bessere Löscheigenschaften als das Löschmittel Wasser.

4.1.2 Brandklasse B

Zur Brandklasse B zählen alle Brände von flüssigen und bei Erwärmung flüssig werdenden brennbaren Stoffen.

4.1.2.1 Einteilung

Die Entzündbarkeit von flüssigen brennbaren Stoffen ist abhängig von der Flüssigkeitstemperatur, bei der sich (unter festgelegten Bedingungen) Dämpfe in solchen Mengen entwickeln, dass über dem Flüssigkeitsspiegel ein durch Fremdzündung entzündbares Dampf-/Luft-Gemisch entsteht. Diese Temperatur der Flüssigkeit wird als **Flammpunkt** bezeichnet.

Anhand des Flammpunktes kann die Feuergefährlichkeit einer brennbaren Flüssigkeit ermittelt werden. Am gefährlichsten sind solche brennbaren Flüssigkeiten, die schon bei normaler Umgebungstemperatur ihren Flammpunkt überschritten haben, also genügend brennbare Dämpfe zur Entzündung liefern, wie z. B. Benzin mit einem Flammpunkt von unter -20 °C. Ungefährlicher sind solche Flüssigkeiten, die erst auf ihren Flammpunkt erwärmt werden müssen, um genügend Mengen an brennbaren Dämpfen für eine Verbrennung zu liefern, wie z. B. Diesel mit einem Flammpunkt von mehr als 55 °C.

4.1.2.2 Ausbreitung von Dämpfen brennbarer Flüssigkeiten

Die Dämpfe der am häufigsten verwendeten brennbaren Flüssigkeiten sind bis auf wenige Ausnahmen (z. B. Blausäure) schwerer als Luft. Die Dämpfe können sich in Vertiefungen ansammeln oder über Kanäle und Schächte ausbreiten, was zu einer Entzündung an weiter entfernt vom Austrittsort gelegenen Stellen und Rückschlag der Flammenfront bis zur ursprünglichen Leckage führen kann.

4.1.2.3 Einsatzmaßnahmen

Folgende Maßnahmen sind nach FwDV 500 bei Vorliegen von brennbaren Flüssigkeiten durchzuführen:

- ⇒ Atem- und Körperschutz tragen.
- ⇒ Im Brandfall mit Schaum löschen, Behälter und Umgebung kühlen.
- ⇒ Ausbreitung verhindern.
- ⇒ Flüssigkeit mit Schaum abdecken.
- ⇒ Kanalisation und tiefer gelegene Räume sichern.
- ⇒ Messgeräte (Ex-Messgeräte) einsetzen.
- ⇒ Zündquellen fernhalten.

4.1.3 Brandklasse C

Zu dieser Brandklasse gehören die Brände von Gasen.

4.1.3.1 Einteilung

Brennbare Gase können wie folgt an Einsatzstellen vorliegen:

Tab. 1: Einteilung der brennbaren Gase

Form	Beispiele
<i>Flüssiggase</i> - Liegen unter Druck bei Raumtemperatur immer flüssig vor	Propan, Butan
<i>Komprimierte oder verdichtete Gase</i> - Liegen unter Druck bei Raumtemperatur immer gasförmig vor	Wasserstoff, Methan (Erdgas)
<i>Tiefkalte Gase</i> - Liegen als tiefkalte Flüssigkeit bei der Temperatur des jeweiligen Siedepunktes vor	Wasserstoff
<i>Gelöste Gase</i> - Liegen unter Druck in einer Flüssigkeit gelöst vor	Acetylen
<i>Freigesetzte Gase infolge von Bränden oder Reaktionen</i>	Reaktionen von Säuren und Laugen mit Metallen (z. B. Wasserstoff), bei Bränden (z. B. Kohlenmonoxid)

4.1.3.2 Einsatzmaßnahmen

Folgende Maßnahmen sind nach FwDV 500 bei Vorliegen von gasförmigen Stoffen durchzuführen:

- ⇒ Atem- und Körperschutz tragen.
- ⇒ Gaswolke mit Sprühstrahl niederschlagen.
- ⇒ Im Brandfall Behälter und Umgebung kühlen.
- ⇒ Brennendes Gas nicht löschen, Gaszufuhr sperren.
- ⇒ Bei Lecks an Flüssiggastanks: Kein Wasser auf den Behälter .
- ⇒ Kanalisation und tiefer gelegene Räume sichern.
- ⇒ Messgeräte einsetzen.
- ⇒ Zündquellen fernhalten.

4.1.4 Brandklasse D

In der Brandklasse D werden die Brände von Metallen zusammengefasst.

Außer den Edelmetallen und einigen anderen Ausnahmen sind alle Metalle unter bestimmten Voraussetzungen mehr oder weniger gut brennbar. Die wichtigsten brennbaren Metalle sind die Leichtmetalle.

Zweckmäßigerweise teilt man die Leichtmetalle entsprechend ihres Reaktionsverhaltens mit Wasser in zwei Gruppen:

4.1.4.1 Leichtmetalle, die bereits in kaltem Zustand mit Wasser merklich reagieren

Zu dieser Gruppe gehören Metalle wie Lithium, Natrium, Calcium, Barium und Kalium, die hauptsächlich in der chemischen Industrie eingesetzt werden.

Alle Metalle dieser Gruppe sind unter bestimmten Voraussetzungen selbstentzündlich und müssen daher unter Vakuum oder unter einer wasserfreien Flüssigkeit (z. B. Petroleum) aufbewahrt werden. Bei Berührung mit Wasser reagieren diese Stoffe sehr heftig, wobei Wasserstoff freigesetzt wird.

4.1.4.2 Leichtmetalle, die nur in brennendem Zustand mit Wasser reagieren

Zu dieser Gruppe gehören zahlreiche Werkstoffe, die technisch meistens als Legierungen zur Herstellung von Geräten und Werkzeugen verwendet werden, aber auch im Bauwesen und im Fahrzeugbau große Bedeutung haben. Es handelt sich um die Leichtmetalle Beryllium, Magnesium, Aluminium und Titan.

Während die Metalle dieser Gruppe in kaltem Zustand durchaus mit Wasser in Berührung kommen dürfen, reagieren sie brennend mit Wasser sehr heftig.

Leichtmetallbrände erzeugen Verbrennungstemperaturen von ca. 2000 bis 3000 °C. Bei diesen hohen Temperaturen kommt es zur thermischen Dissoziation (Aufspaltung durch Wärme) des Wassers. Der abgespaltene Sauerstoff lagert sich an das Metall an, während der freiwerdende Wasserstoff explosionsartig mit dem Luftsauerstoff verbrennt.

4.1.5 Brandklasse F

Zur Brandklasse F gehören Brände von Speiseölen/-fetten (pflanzliche oder tierische Öle und Fette) in Frittier- und Fettbackgeräten oder anderen Kücheneinrichtungen und -geräten.

Die brennbaren Stoffe der Brandklasse F entstammen ursprünglich der Brandklasse B und entsprechen in ihrem Brandverhalten weitgehend den hochsiedenden flüssigen und flüchtigwerdenden Stoffen.

Beim Löschen dieser Flüssigkeiten mit ABC-Pulverlöschern traten immer wieder folgende Komplikationen auf:

- Rückzündungen wegen mangelnder Abkühlung
- Ausweitung des Schadens durch falsch eingesetzte Löscher
- große Verschmutzungen durch Pulverwolken

Aus diesen Gründen wurden spezielle Feuerlöscher für solche Brände entwickelt.

Um eine entsprechende Kennzeichnung und Zuordnung der Feuerlöscher vornehmen zu können, wurde die Brandklasse F eingeführt.

4.2 Brandkenngößen

Folgende Kenngrößen sind für Verbrennungsreaktionen charakteristisch und werden im Folgenden weiter erläutert:

- **Entzündbarkeit**
- **Brennbarkeit**
- **Brandtemperatur**
- **Abbrandrate / Verbrennungsgeschwindigkeit**

Achtung: Die Brandkenngößen hängen nicht nur von der chemischen Zusammensetzung der Brennstoffe, sondern sehr stark vom Zustand der Stoffe (Aggregatzustand, spezifische Oberfläche, Dichte etc.) ab und können daher beim selben Stoff sehr weit schwanken.

Die Verbrennung ist z. B. bei fein verteilten brennbaren Stoffen intensiver als bei massiv vorliegenden Stoffen, da eine bessere Mischung von Sauerstoff und brennbarem Stoff vorliegt.

4.2.1 Entzündbarkeit

Der Begriff **Entzündbarkeit** bezieht sich auf die Einleitung des Brennens, also auf den Vorgang der Entzündung.

Ein brennbarer Stoff ist umso leichter entzündbar, je weniger Energie zum Zünden erforderlich ist.

Demnach werden die brennbaren Stoffe wie folgt eingeteilt:

- **schwer entzündbar:** Stoffe, die mit einer Streichholzflamme nicht mehr entzündet werden können und eine stärkere Zündquelle erfordern, z. B. Koks.
- **normal entzündbar:** Stoffe, die mit einer Streichholzflamme entzündet werden können, z. B. Papier.
- **leicht entzündbar:** Stoffe, die bereits mit einem Funken entzündet werden können, z. B. Acetylen.
- **selbstentzündlich:** Stoffe und Stoffkombinationen, die zur Entzündung keiner fremden Zündquelle bedürfen, sondern die zur Entzündung führende Wärmeenergie aus der eigenen Oxidation entwickeln, z. B. feucht eingelagertes Heu.

4.2.2 Brennbarkeit

Der Begriff **Brennbarkeit** beschreibt die Befähigung zur selbstständigen Aufrechterhaltung der stabilen Verbrennung nach Entfernung der Zündquelle.

Neben anderen Kriterien wird die Brennbarkeit im baulichen Brandschutz zur Einteilung in die Baustoffklassen verwendet.

Nach ihrer Brennbarkeit werden die brennbaren Stoffe wie folgt eingeteilt:

- **schwer brennbar:** Stoffe, die nur bei Zufuhr von Fremdwärme weiter brennen und bei Fortnahme der Zündquelle verlöschen, z. B. Sicherheitskinofilm.
- **normal brennbar:** Stoffe, die von selbst mit normaler Geschwindigkeit weiter brennen, z. B. Holz > 2mm, Pappe.
- **leicht brennbar:** Stoffe, die mit hoher Geschwindigkeit und schnellem Freisetzen der Verbrennungswärme abbrennen, z. B. Celluloid, Watte.

4.2.3 Brandtemperatur

Die Brandtemperatur ist abhängig von der Verbrennungswärme (Heizwert) und wie schnell diese freigesetzt wird. Zum Beispiel brennt Magnesium mit einem Heizwert von 25 MJ/kg bei Temperaturen von 2000 - 3000 °C, während Phosphor mit gleichem Heizwert bei 800 °C abbrennt.

Tab. 2 zeigt eine Übersicht ausgewählter Brandtemperaturen.

Tab. 2: Übersicht ausgewählter Brandtemperaturen

Brand	Brandtemperatur in °C
Schwelbrände	200 - 300
Zimmerbrände	500 - 800
Hausmüll	700 - 900
Großbrände	800 - 1000
Holz/Diesel	900 - 1000
Benzin	1050 - 1150
Brennbare Gase	1050 - 1450
Metallbrände	über 2500

4.2.4 Abbrandrate / Verbrennungsgeschwindigkeit

Die Abbrandrate beschreibt den Masseverlust eines brennenden Stoffes in einer bestimmten Zeit. Holz hat z. B. eine Abbrandrate von 0,8 kg/m²·min, während Celluloid mit einer Geschwindigkeit von 70 kg/m²·min abbrennt.

Neben dem Sauerstoffangebot ist die Abbrandrate von den Strömungsverhältnissen und der Umgebungstemperatur abhängig.

4.3 Verbrennungswärme

Unter der Verbrennungswärme versteht man die Wärmeenergie, die bei der vollständigen Verbrennung einer bestimmten Masse eines Brennstoffes freigesetzt wird. Man bezeichnet sie auch als **Heizwert H_i** ¹.

Nachfolgende Tabelle zeigt die Heizwerte einiger Brennstoffe. Auffällig hierbei ist, dass die Heizwerte flüssiger Brennstoffe ca. doppelt so groß sind wie die fester Brennstoffe. Auch wenn die Brandtemperatur, wie erwähnt, nicht nur vom Heizwert, sondern auch von der Schnelligkeit der Stoffumsetzung abhängt, kann insbesondere bei Bränden von Gasen und Dämpfen ein Schutz der vorgehenden Trupps mit Wärmeschutzbekleidung sinnvoll sein.

Tab. 3: Heizwerte H_i verschiedener Brennstoffe

Aggregatzustand	Heizwerte H_i					
	natürliche Brennstoffe			veredelte Brennstoffe		
fest	Braunkohle	15	MJ/kg	Holz Kohle	26	MJ/kg
	Laubhölzer	18	MJ/kg	Briketts	21	MJ/kg
	Nadelhölzer	20	MJ/kg	Koks	30	MJ/kg
	Steinkohle	32	MJ/kg	Polyethylen PE	46,5	MJ/kg
flüssig	Erdöl	40	MJ/kg	Heizöl	41	MJ/kg
				Benzin	43	MJ/kg
				Methanol	19	MJ/kg
gasförmig	Erdgas	32-38	MJ/m ³	Methan	36	MJ/m ³
				Kohlenmonoxid	13	MJ/m ³
				Wasserstoff	11	MJ/m ³
				Acetylen	57	MJ/m ³
				Propan	93	MJ/m ³
				Butan	124	MJ/m ³

5 Sauerstoff

Der zur Verbrennung notwendige Sauerstoff ist zu ca. 21 Vol.-% in der Umgebungsluft vorhanden. Die weiteren Bestandteile der Luft sind nicht reagierende (inerte) Stoffe, die sich hemmend auf die Verbrennungsreaktion auswirken. Hauptbestandteil ist hierbei der Stickstoff, welcher zu ca. 78 Vol.-% im Gasgemisch „Luft“ vorliegt.

Neben dem elementaren Sauerstoff gibt es eine ganze Reihe von Verbindungen, die sehr viel Sauerstoff enthalten, der bei Erwärmung abgespalten wird. Mischungen solcher Oxidationsmittel mit brennbaren Stoffen ergeben schnell verbrennende Schieß- oder Sprengstoffe.

¹ Index „i“ steht für lat. *inferior* („niedriger“); frühere Bezeichnung: unterer Heizwert H_u

5.1 Reduzierung der Sauerstoffzufuhr

Die meisten Brände erlöschen bei einer Sauerstoffkonzentration von 15 bis 17 Vol.-%. Es gibt jedoch einige Stoffe, die auch noch bei geringerer Sauerstoffkonzentration brennen. So erlischt Butan erst bei einer Sauerstoffkonzentration von weniger als 12 Vol.-% und Wasserstoff erst bei einer Sauerstoffkonzentration von weniger als 5 Vol.-%. Die Sauerstoffkonzentration ab der ein Brand erlischt ist abhängig vom jeweiligen Brennstoff und wird **Mindestsauerstoffkonzentration** genannt.

Einen Brand, der unter ungenügender Sauerstoffzufuhr und niedriger Verbrennungstemperatur stattfindet, bezeichnet man als **Schwelbrand**. Dabei entstehen durch die thermische Aufbereitung (Pyrolyse) der brennbaren Stoffe brennbare Gase und Dämpfe sowie un- oder teilverbrannte Folgeprodukte, von denen viele stark giftig oder krebserregend sind. Das wichtigste Brandfolgeprodukt des Kohlenstoffes ist das giftige und brennbare Kohlenstoffmonoxid (CO).

Schwelt ein Brand in einem geschlossenen Raum oder Gebäude länger unbemerkt und sind sonst alle Voraussetzungen des Brennens erfüllt, kann es bei Sauerstoffzutritt, z. B. durch eine platzende Scheibe oder eine plötzlich geöffnete Tür, zu einer Rauchexplosion kommen.

Folgende Maßnahmen sind bei Schwelbränden zu prüfen:

- ⇒ Vorgehende Trupps auf Risiken hinweisen.
- ⇒ Wärmebildkamera einsetzen.
- ⇒ Kontrolle von Hohlräumen (z. B. Zwischendecken).
- ⇒ Brandschutz sicherstellen.
- ⇒ Brandnester freilegen und lüften, dabei Durchzündungsgefahr beachten.
- ⇒ Bei Silobränden: Einsatz von Löschgasen.
- ⇒ Schaum- oder Netzmitteleinsatz prüfen.

5.2 Erhöhung der Sauerstoffzufuhr

Sauerstoff reagiert mit den meisten Stoffen. Je höher die Sauerstoffkonzentration und der Druck in der Atmosphäre oder in einem Sauerstoffsystern sind, umso:

- heftiger verläuft die Verbrennungsreaktion bzw. das Feuer,
- niedriger sind die zum Starten der Verbrennungsreaktion erforderliche Zündtemperatur und Zündenergie,
- höher sind die Flammentemperatur und die Zerstörungsfähigkeit der Flamme.

Das bedeutet, dass eine erhöhte Sauerstoffkonzentration folgende Brandkenngrößen steigert:

Entzündbarkeit, Brennbarkeit, Abbrandrate / Verbrennungsgeschwindigkeit und Brandtemperatur

Hohe Sauerstoffkonzentrationen sind überall dort möglich, wo reiner Sauerstoff Anwendung findet, wie z. B. in der Medizin, bei Gaslieferanten und in der Technik. Außerdem wird Sauerstoff in der Stahlindustrie, in der chemischen Industrie, in der Umwelttechnik und in der Lebensmittelindustrie verwendet. In diesen Anwendungsbereichen ist eine sorgfältige Erkundung bezüglich gesteigerter Sauerstoffkonzentrationen notwendig.

Materialien, einschließlich feuerbeständiger Materialien, die in Luft nicht brennen, können in sauerstoffangereicherter Luft oder in reinem Sauerstoff heftig brennen. In sauerstoffangereicherter Atmosphäre kann z. B. die Feuerschutzkleidung gefährlich und heftig brennen. Das Gleiche gilt für Kunststoffe.

Folgende Punkte sollten bei erhöhten Sauerstoffkonzentrationen beachtet werden:

- ⇒ Vorgehende Trupps auf Risiken hinweisen.
- ⇒ Brandschutz sicherstellen.
- ⇒ Brennbare Materialien entfernen.
- ⇒ Weitere Sauerstoffzufuhr absperren.
- ⇒ Messgeräte, insbesondere an Tiefpunkten (Abläufe etc.), einsetzen.
- ⇒ Zündquellen vermeiden.
- ⇒ Nach dem Einsatz in sauerstoffangereicherten Atmosphären Einsatzkräfte von Zündquellen fernhalten und Kleidung lüften.
- ⇒ Achtung: Personen, die in sauerstoffangereicherten Atmosphären in Brand geraten sind, setzen nahezu sicher auch Helfer in Brand, die zur Menschenrettung in diese Bereiche hineinlaufen.

6 Richtiges Mengenverhältnis

Bei dampfbildenden, bei gasförmigen und bei staubförmigen brennbaren Stoffen bestimmt deren Konzentration in der Luft das Brandverhalten (Mischungsverhältnis).

Es gibt für die verschiedenen brennbaren Dämpfe, Gase, Nebel und/oder Stäube einen zündfähigen Mischungsbereich, der jeweils zwischen einer stoffspezifischen unteren und oberen Grenze liegt. Wird das so genannte optimale Mischungsverhältnis erreicht, kann sich die Verbrennungsgeschwindigkeit bis zur Explosion steigern.

Dieser Bereich, innerhalb dessen die Zündung und Verbrennung möglich ist, nennt man **Explosionsbereich**. Die Grenzen zwischen der unteren bzw. oberen Konzentration des brennbaren Stoffes, bei denen es gerade nicht mehr zur Verbrennung kommt, nennt man **untere bzw. obere Explosionsgrenze**.

Nachfolgende Tabelle zeigt die Explosionsbereiche verschiedener brennbarer Dämpfe und Gase:

Tab. 4: Explosionsgrenzen verschiedener brennbarer Stoffe

Substanz	UEG in Vol.-%	OEG in Vol.-%
Alkohol	3,0	15,0
Benzin	0,6	8,0
Aceton	2,5	13,0
Wasserstoff	4,0	75,6
Methan	4,4	16,5
Propan	2,1	9,5
Acetylen	1,5	82,0
Kohlenstoffmonoxid	12,0	74,0

Stoffe mit einem großen Explosionsbereich und / oder einer niedrigen unteren Explosionsgrenze sind am gefährlichsten einzustufen.

Feinst verteilte, feste brennbare Stoffe (z. B. Stäube) sind bezüglich Entzündbarkeit und Verbrennungsgeschwindigkeit vergleichbar mit dampfbildenden und gasförmigen Stoffen.

Brennbare Stäube gelten als explosionsfähig, wenn die Teilchengröße weniger als 1 mm beträgt. Bei Stäuben kann der Durchmesser der Staubpartikel aber auch im Mikrometerbereich liegen (1 Mikrometer = 0,001 Millimeter). Dadurch ergeben sich bei einigen Stäuben Oberflächen von mehreren hundert Quadratmeter je Kilogramm, worauf die bis zur Explosionswirkung gesteigerte Abbrandgeschwindigkeit beruht. Für solche Staubexplosionen kommen auch Stoffe in Frage, von denen in kompakter Form keine Gefahr ausgeht. Tab. 5 gibt die unteren Explosionsgrenzen von verschiedenen Stäuben und die Orte, an denen diese vorkommen können, wieder. In der Regel wird für brennbare Stäube nur die untere Explosionsgrenze bestimmt, da die obere Explosionsgrenze für Sicherheitskonzepte wenig Bedeutung hat.

Tab. 5: Untere Explosionsgrenzen ausgewählter Stäube

Ort	Material	UEG in g/m ³
Schreinerei	Holzmehl	30
Mühle	Weizenmehl	125
Schleiferei	Aluminiumstaub	15
Bergbau	Kohlestaub	60

Zur Verdeutlichung: Bei 30 g/m³ sieht man eine 40 Watt Lampe in 1 m Entfernung nicht mehr.

7 Zündenergie

Auch wenn alle stofflichen Voraussetzungen des Brennens erfüllt sind, kommt es zumeist noch nicht zur offenen Verbrennung. Hierzu bedarf es noch eines energetischen Anstoßes, der das zündfähige System in einen erforderlichen Mindestwärmeszustand versetzt.

Die Zündenergie, die zur Einleitung der Verbrennung mindestens zugeführt werden muss, bezeichnet man als Mindestentzündungsenergie. Der brennbare Stoff erreicht dann einen Wärmeszustand, der **Zündtemperatur** genannt wird. Die Zufuhr der Zündenergie wird bei den meisten brennbaren Stoffen zuvor benötigt, um den Brennstoff thermisch aufzubereiten, das heißt der brennbare Stoff muss ggf. aufgewärmt, zersetzt, verschwelt, verflüssigt oder verdampft werden.

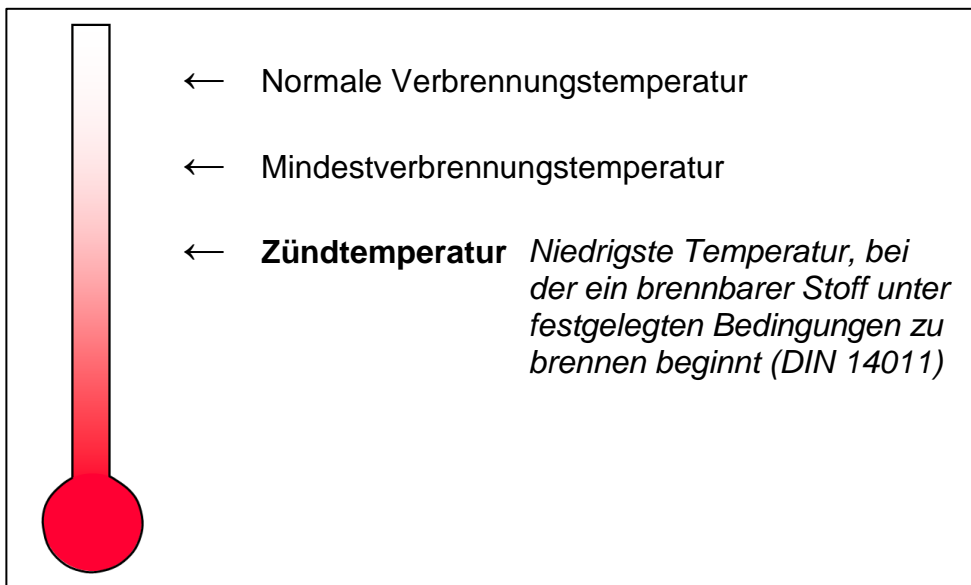


Abb. 3: Verbrennungstemperaturen

Nach Überschreiten der Zündtemperatur wird die Verbrennung eingeleitet. Zur Fortsetzung der Verbrennung ist ständig Wärme erforderlich, welche beim Verbrennungsvorgang entsteht. Erst wenn die so genannte **Mindestverbrennungstemperatur** erreicht wird, die oft wesentlich höher als die Zündtemperatur ist (z. B. Zündtemperatur Propan: 460 °C, Mindestverbrennungstemperatur Propan: 1200 °C), läuft die Verbrennung selbstständig ab. Ein Teil der dann produzierten Wärme steht zur weiteren thermischen Aufbereitung des Brennstoffs zur Verfügung, der andere, weitaus größere Teil wird als Wärmeverlust an die Umgebung abgegeben. In Abhängigkeit von den Wärmeverlusten und der zur Aufbereitung notwendigen Energie stellt sich nach Überschreitung der Mindestverbrennungstemperatur im weiteren Verlauf die **Normale Verbrennungstemperatur** ein.

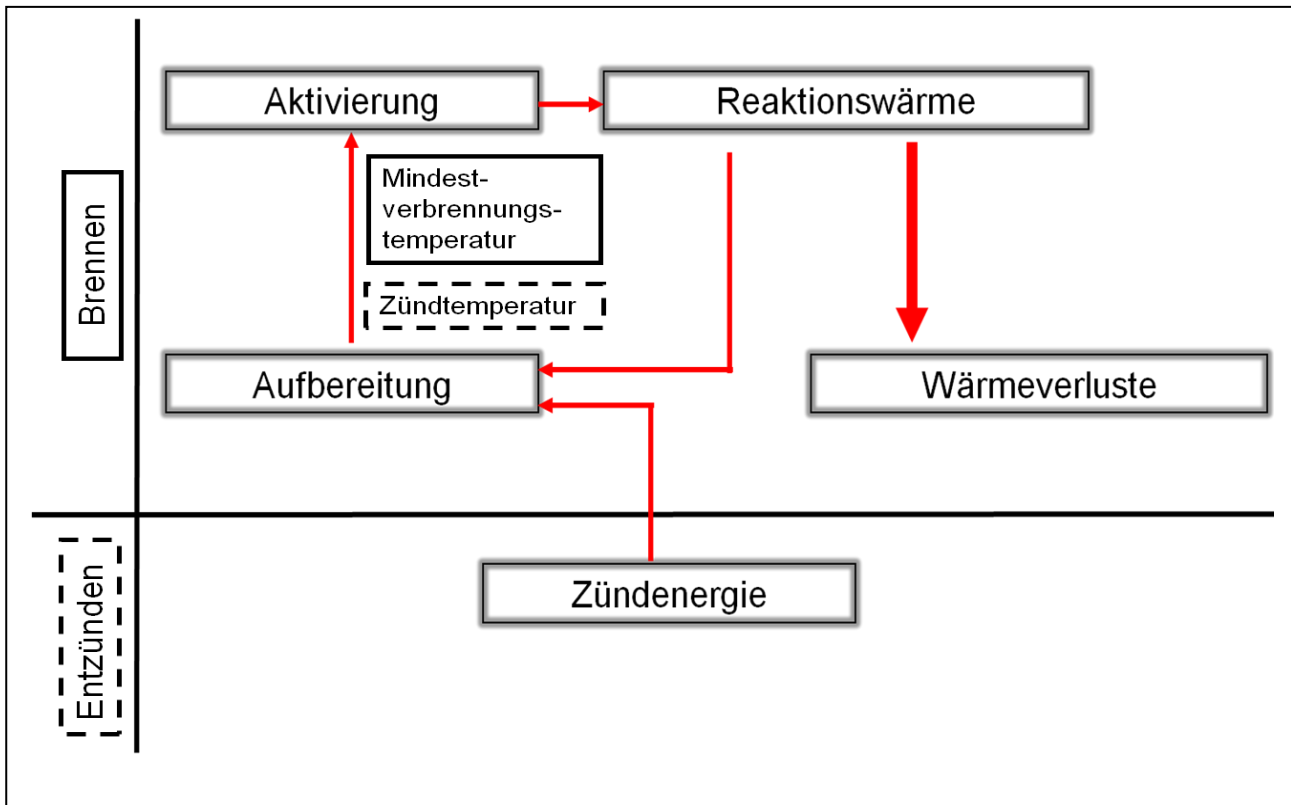


Abb. 4: Prozessschema zur Einleitung der Verbrennung

7.1 Temperaturklassen

Besondere Bedeutung hat die Zündtemperatur in Bereichen, in denen eine explosionsfähige Atmosphäre vorliegt, denn hier kommen elektrische Betriebsmittel zum Einsatz, die im Betrieb warme Oberflächen produzieren. Um eine Zündung durch diese Oberflächen zu verhindern, werden die explosionsgeschützten Betriebsmittel in Temperaturklassen eingeteilt.

Tab. 6: Temperaturklasseneinteilung

Temperatur-klasse	Höchstzulässige Oberflächentemperatur der Betriebsmittel in °C
T 1	450
T 2	300
T 3	200
T 4	135
T 5	100
T 6	85

Tab. 7: Zündtemperaturen ausgewählter Stoffe

Stoff	Zündtemperatur in °C
Methan	650
Butan	400
Benzin	220-450
Ether	170
Schwefelkohlenstoff	102

7.2 Selbstentzündung

Die Selbstentzündung ist eine altbekannte Brandursache, welche auf spezielle chemische, biologische und physikalische Vorgänge zurückzuführen ist.

Selbstentzündungen können wie bei weißem Phosphor sofort, innerhalb von Minuten oder nach Stunden erfolgen, bei trocknenden Ölen auf saugfähigen Stoffen und Heu nach Tagen bzw. Wochen oder bei Kohle und Torf nach Monaten auftreten.

7.2.1 Voraussetzungen

Zur Selbstentzündung sind zwei Voraussetzungen nötig:

Erstens muss der Brennstoff bereits bei normaler Temperatur merklich oxidieren und zweitens darf die bei der Oxidation des Stoffes entstehende Wärme nicht vollständig an die Umgebung abgeführt werden.

Dieser Wärmestau führt zu einer starken Erhöhung der Oxidationsgeschwindigkeit, wodurch wiederum schneller Wärme erzeugt wird. Der Vorgang schaukelt sich solange auf, bis die Zündtemperatur des Brennstoffes erreicht ist.

7.2.2 Beispiele

Selbstentzündliche Stoffen und Stoffgemischen können grob in drei Gruppen klassifiziert werden:

Selbstentzündung an der Luft:

z. B. Leinölfirnis, Heu, weißer Phosphor

Selbstentzündung bei Wasserkontakt:

z. B. Kalium, Natrium, Lithium

Selbstentzündliche Stoffgemische:

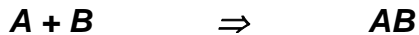
z. B. Sauerstoff / Öl, Salpetersäure / Holzspäne, Kaliumpermanganat / Glycerin

Die Selbstentzündung von Heu zum Beispiel wird durch Bakterientätigkeiten ausgelöst. Diese Bakterien sind bis ca. 70 °C für die Wärmezeugung verantwortlich. Über dieser Temperatur sterben die Bakterien ab, jedoch reicht die Temperatur nun aus, um das Heu selbst zur Oxidation zu bringen und somit den Wärmestau bis hin zur Entzündung fortzuführen.

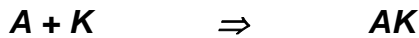
8 Katalysator

Die meisten Verbrennungsreaktionen sind gehemmte Reaktionen. Auch beim Vorliegen aller stofflichen Voraussetzungen bedarf es noch eines energetischen Anstoßes, damit es zu einer selbstständig ablaufenden Verbrennung kommen kann. Dieser energetische Anstoß wird als **Aktivierungsenergie** bezeichnet.

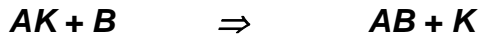
Die Aktivierungsenergie ist eine systemspezifische Größe und hängt unter anderem von den an der Reaktion beteiligten Stoffen ab. Bei Verbrennungsvorgängen in Luft ist die Aktivierungsenergie in erster Linie abhängig vom brennbaren Stoff. Es können jedoch auch andere Stoffe, die in der chemischen Gleichung für die Reaktion nicht auftauchen, Einfluss auf die Aktivierungsenergie nehmen. Solche Stoffe nennt man **Katalysatoren**:



Die Reaktion zwischen den Ausgangsstoffen A und B kann nur mit sehr hoher Aktivierungsenergie ablaufen.



Die Reaktion eines Ausgangsstoffes A mit einem Katalysator K läuft mit geringerer Aktivierungsenergie ab.



Diese Reaktion läuft mit geringerer Aktivierungsenergie ab und der Katalysator wird wieder frei für weitere Zwischenreaktionen.

Es genügen geringe Mengen des Katalysators K, um große Mengen von brennbaren Stoffen A und B umzusetzen. Da die Zwischenverbindung AK eine geringere Aktivierungsenergie zur Reaktion benötigt, kann die Reaktion schon bei niedrigeren Temperaturen mit hoher Reaktionsgeschwindigkeit ablaufen.

Ein Katalysator kann eine unmögliche Reaktion nicht möglich machen. Er erhöht lediglich die Reaktionsgeschwindigkeit bzw. ermöglicht die Reaktion schon auf einem geringeren Temperaturniveau.

Für Verbrennungsreaktionen bedeutet dies, dass durch die Anwesenheit geeigneter Katalysatoren die Zündenergie bzw. die Zündtemperatur und die Mindestverbrennungstemperatur stark gesenkt werden.

Katalysatoren spielen bei der Verbrennung in der Gasphase (Flamme) eine besonders große Rolle. Dabei sind hauptsächlich die Wasserstoff- und Hydroxylradikale für den Start und die Aufrechterhaltung der chemischen Abläufe in der Flamme von Bedeutung. Diese Radikale entstehen aus Wassermolekülen, die durch die Luftfeuchtigkeit überall vorhanden sind. Durch Energieübertragung auf diese Wassermoleküle, z. B. durch Strahlung oder Stöße infolge der Wärmebewegung, wird ein geringer Teil dieser Moleküle gespalten.

Es entstehen je ein Wasserstoffradikal (H^*) und ein Hydroxylradikal (OH^*). Diese Molekülbruchstücke sind sehr energiereich, reaktionsfreudig und kurzlebig, sie werden durch die Verbrennung immer wieder neu gebildet.



9 Phänomene der schnellen Brandausbreitung

Die Phänomene der schnellen Brandausbreitung sind komplexe, für den Wohnungsbrand noch nicht abschließend wissenschaftlich untersuchte Verbrennungsreaktionen. Nachfolgend werden die Begriffe Explosion, Rauchdurchzündung, Raumdurchzündung und Rauchexplosion definiert und die dahintersteckenden Abläufe kurz erläutert.

Zu den Anzeichen, zur Vorgehensweise im Innenangriff und insbesondere zur sicheren Brandbekämpfung bei Gefahr der schnellen Brandausbreitung sei an dieser Stelle auf die „Lehrunterlage Atemschutzeinsatz“² verwiesen.

9.1 Explosion

Unter einer **Explosion** versteht man eine plötzliche Oxidationsreaktion eines zündfähigen Gemisches, die eine Temperatur- und/oder Druckerhöhung bewirkt (DIN 14011), also eine sehr schnell ablaufende chemische Reaktion, bei der große Wärme- und Gasmengen freigesetzt werden. Die erwärmten Gase dehnen sich schlagartig aus und rufen eine Druckwelle hervor.

9.2 Rauchdurchzündung (Rollover)

Definition nach DIN 14011:

Durchzündung entzündbarer Pyrolyseprodukte und Schwelgase, die sich in der Regel als Rauchschiicht in einem Raum ansammeln

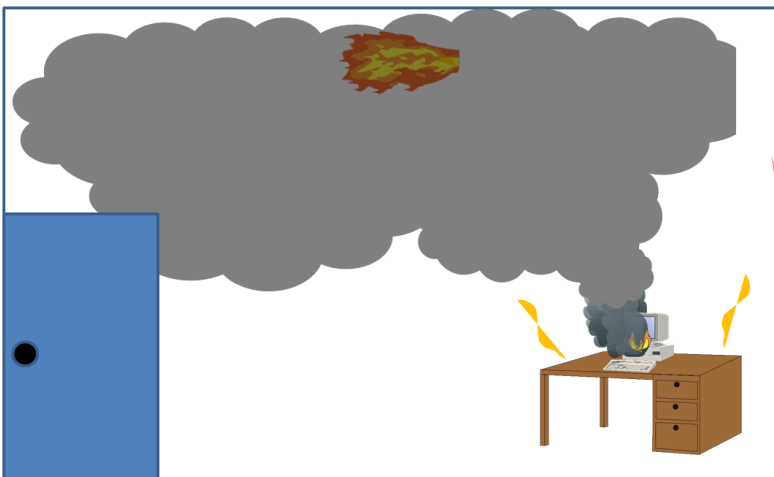


Abb. 5: Vereinfachte Darstellung der Rauchdurchzündung

Ablauf

Entstehungsbrand bei genügender Sauerstoffzufuhr

- ⇒ Entstehung von Pyrolyseprodukten und Schwelgasen
- ⇒ Ausbildung einer warmen Rauchschiicht im Deckenbereich (Wärmestau)
- ⇒ Überschreitung der unteren Explosionsgrenze (UEG) und Erreichen der Zündtemperatur
- ⇒ Durchzündung der Rauchschiicht

² siehe Downloadbereich Homepage der HLFS

9.3 Raumdurchzündung (Flashover)

Definition nach DIN 14011:

schlagartige Ausbreitung eines Brandes auf alle thermisch aufbereiteten Oberflächen brennbarer Stoffe in einem Raum

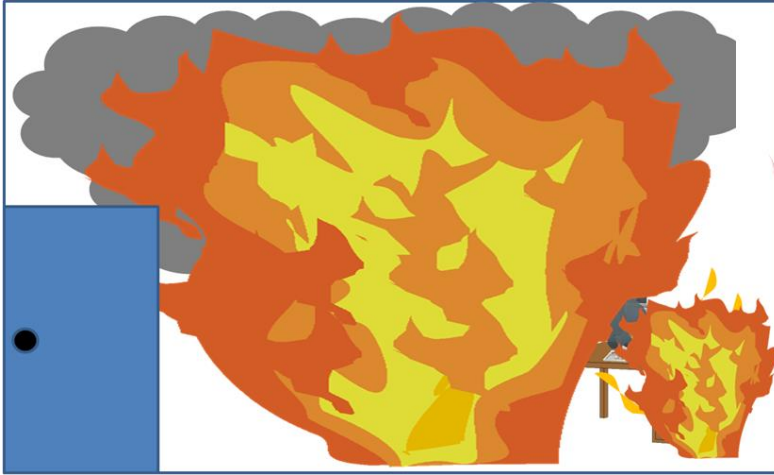


Abb. 6: Vereinfachte Darstellung der Raumdurchzündung

Ablauf

Entstehungsbrand bei genügender Sauerstoffzufuhr

- ⇒ Entstehung von Pyrolyseprodukten und Schwelgasen
- ⇒ Ausbildung einer warmen Rauchschiicht im Deckenbereich (Wärmestau)
- ⇒ Wärmestrahlung aus der Rauchschiicht bereitet auch weiter vom Brandherd entfernte Stoffe thermisch auf
- ⇒ Bildung zusätzlicher Pyrolyseprodukte und Schwelgase
- ⇒ Überschreitung der unteren Explosionsgrenze (UEG) und Erreichen der Zündtemperatur
- ⇒ Durchzündung der Rauchschiicht
- ⇒ Herausschlagen von Stichflammen aus den Raumöffnungen
- ⇒ Vollbrand
- ⇒ Zerstörung von kleineren Bauteilen (z. B. Türen, Fenster)

9.4 Rauchexplosion (Backdraft)

Definition nach DIN 14011:

Explosion der Pyrolyseprodukte und Schwelgase in einem Brandraum mit unzureichender Sauerstoffkonzentration nach Vermischung mit plötzlich zugetretener Luft

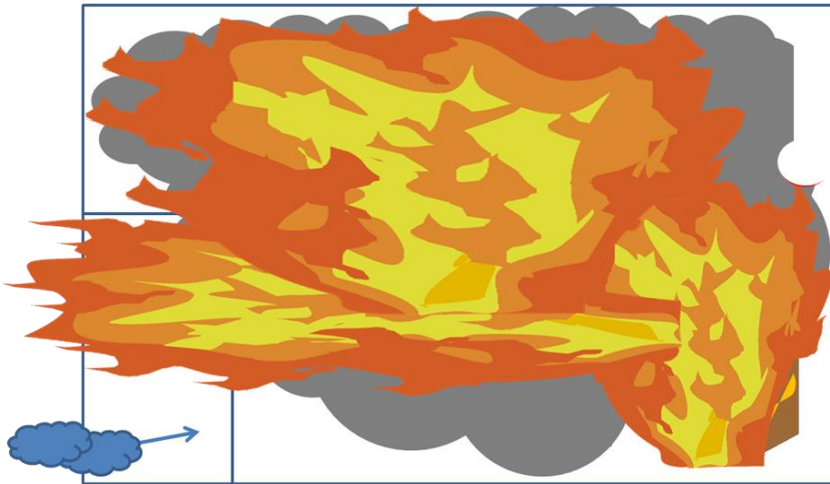


Abb. 7: Vereinfachte Darstellung der Rauchexplosion

Ablauf

Entstehungsbrand bei unzureichender Sauerstoffzufuhr

- ⇒ Entstehung von Pyrolyseprodukten, Schwelgasen und Kohlenstoffmonoxid
- ⇒ Ausbildung einer warmen Rauchsicht im Deckenbereich in Konzentrationen oberhalb der oberen Explosionsgrenze (OEG)
- ⇒ Erlöschen der Flammen infolge Sauerstoffmangels
- ⇒ Abkühlen der Verbrennungsprodukte
- ⇒ Unterdruck im Brandraum
- ⇒ Einströmen von Luft in den Brandraum nach dem Öffnen von Zugängen
- ⇒ Unterschreitung der oberen Explosionsgrenze (OEG) des Gas/Dampf-Luftgemisches
- ⇒ Zündung an nächstgelegener Zündquelle
- ⇒ Herausschlagen von Flammenfront und Druckwelle aus der Lüftungsöffnung
- ⇒ Zerstörung von Gebäudeteilen (z. B. Wände)

10 Löschverfahren

Um einen Brand zu löschen, kommen die folgenden Löschverfahren zur Anwendung:

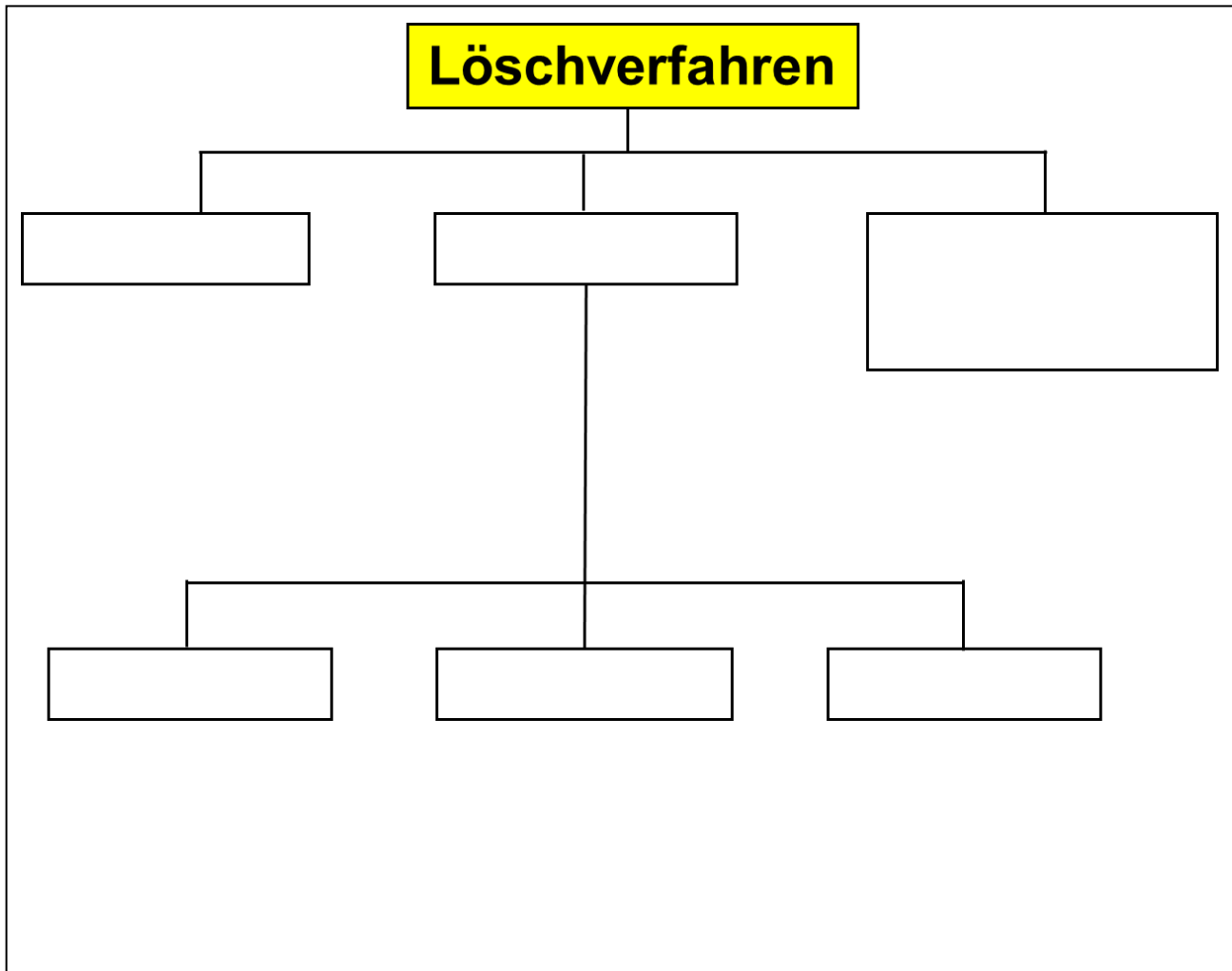


Abb. 8: Löschverfahren

10.1 Abkühlen

Abkühlen ist ein Löschverfahren, bei dem den brennenden Stoffen durch das Löschmittel die zur Aufrechterhaltung der Verbrennung erforderliche Wärme entzogen wird.

Das Entziehen von Energie kann auf zweierlei Arten erfolgen:

- Erwärmen des Löschmittels
- Verdampfen des Löschmittels

Die **kritische Grenztemperatur**, auf die hierbei abgekühlt werden muss, ist nicht die Zündtemperatur, sondern die **Mindestverbrennungstemperatur**. Es ist allerdings darauf zu achten, dass nicht nur die Verbrennungszone entsprechend abgekühlt wird, sondern auch alle stark erwärmten Oberflächen in der Umgebung. Um Rückzündungen zu vermeiden, müssen diese sogar unter die Zündtemperatur der vorhandenen brennbaren Stoffe herunter gekühlt werden.

Da in der Praxis das Löschmittel Wasser mit Abstand die größte abkühlende Löschwirkung zeigt, wird hier nur Bezug auf dieses Löschmittel genommen.

Beim **Erwärmen** eines Stoffes, hier also des Löschmittels, ist seine „spezifische Wärmekapazität“ entscheidend. Diese beträgt beim Wasser rund

$$4,2 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} \left[\frac{\text{Kilojoule}}{\text{Kilogramm Kelvin}} \right]$$

Das heißt, wenn man ein Kilogramm Wasser um ein Kelvin erwärmen möchte, so muss man eine Energie von 4,2 Kilojoule aufwenden. Die Temperaturdifferenz von einem Kelvin entspricht einem Grad Celsius.

Beim **Verdampfen** eines Stoffes ist seine „spezifische Verdampfungswärme“ entscheidend. Diese beträgt bei Wasser rund

$$2.260 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \left[\frac{\text{Kilojoule}}{\text{Kilogramm}} \right]$$

Das heißt, wenn man ein Kilogramm Wasser verdampfen möchte, also von 100 °C flüssig nach 100 °C dampfförmig umwandeln, muss man eine Energie von 2.260 Kilojoule aufwenden.

Fazit: Die beste Löschwirkung wird erzielt, wenn das Löschmittel durch die Aufnahme von Energie aus der Verbrennung sich nicht nur erwärmt, sondern auch seinen Aggregatzustand wechselt.

10.2 Ersticken

Als Ersticken bezeichnet man ein Löschverfahren, bei dem das Brennen durch Verändern des Mengenverhältnisses zwischen brennbarem Stoff und Sauerstoff unterbunden wird. Durch Einwirken auf die Parameter Sauerstoff und brennbarer Stoff werden die Reaktionsbedingungen derart beeinflusst, dass ein Weiterbrennen nicht möglich ist.

Das Verändern des Mengenverhältnisses wird mit dem Löschverfahren Ersticken durch drei verschiedene Möglichkeiten erreicht:

- Ersticken durch **Verdünnen**
(Einflussfaktor Sauerstoff)
- Ersticken durch **Abmagern**
(Einflussfaktor brennbarer Stoff)
- Ersticken durch **Trennen**
(Einflussfaktoren Sauerstoff und brennbarer Stoff)

10.2.1 Verdünnen

Beim Löschverfahren Verdünnen wird die Luftsauerstoffkonzentration von 21 Vol.-% auf die löschwirksame Konzentration von ca. 15 Vol.-%, d. h. unter die zur Aufrechterhaltung der Verbrennung benötigte Mindestsauerstoffkonzentration, gesenkt.

Da zusätzlich ein Sicherheitsüberschuss an Löschgasen in der Atmosphäre vorhanden sein muss, werden große Mengen an geeigneten Löschmitteln benötigt. Die Löschmittelkonzentrationen betragen üblicherweise ca. 30 Vol.-%.

10.2.2 Abmagern

Die Möglichkeit des Löschens durch Abmagern brennbarer Stoffe ist in der praktischen Anwendung für die Feuerwehr auf das Löschmittel Wasser beschränkt. Die Löschwirkung beruht auf der Abkühlung brennender Flüssigkeiten durch den Einsatz von Sprühstrahl unter ihren Flammpunkt. Auch wenn hier der Begriff „Abkühlung“ verwendet wird, besteht eine klare Abgrenzung zum Löschverfahren „Abkühlen“: Beim Abmagern wird in erster Linie das Mengenverhältnis zwischen brennbarem Stoff und Sauerstoff dadurch verändert, dass weniger Brennstoff (brennbare Dämpfe) in die Reaktionszone gelangen. Die Reaktionszone selbst wird nicht gekühlt.

Ein weiterer Effekt beim Abmagern ist, dass beim Mischen wassermischbarer brennbarer Flüssigkeiten mit Wasser deren Flammpunkt steigt. Auch hierdurch wird das Mengenverhältnis der Reaktionspartner beeinflusst und der Anteil an brennbaren Flüssigkeitsdämpfen gesenkt.

10.2.3 Trennen

Das Löschverfahren Trennen beruht auf einer kompletten Trennung der beiden Reaktionspartner Sauerstoff und brennbarer Stoff. Um dieses zu erreichen, wird das Löschmittel mechanisch zwischen die beiden Reaktionspartner eingebracht.

Im weitesten Sinne kann man auch das Abschiebern einer Leitung, aus der brennendes Gas oder eine brennende Flüssigkeit austritt, als Trennen bezeichnen.

10.3 Hemmen der Reaktion

Das reaktionshemmende Löschverfahren beruht auf der Tatsache, dass die zum Aufrechterhalten der Flammenreaktionen notwendigen sehr energiereichen Reaktionspartner durch den Aufprall auf eine Wand ihre Energie verlieren und nicht mehr miteinander reagieren können.

In der Praxis wird diese Wand durch die Oberfläche eines Löschpulverteilchens dargestellt. Auch im tatsächlichen Größenvergleich ist ein Löschpulverteilchen um ein Vielfaches größer als die Reaktionspartner. Da man zur Erklärung des Löscheffektes diese bildliche Darstellung zu Hilfe nimmt, spricht man hierbei auch vom „Wandeffekt“. Bei der Anwendung dieses Löschverfahrens ist es wichtig, dass das Löschmittel im gesamten Bereich der Flammenreaktion zur Wirkung kommt.

Die genormte Bezeichnung für dieses Löschverfahren lautet „inhibierende Löschwirkung“. Dabei leitet sich inhibierend vom lateinischen Wort inhibere (= anhalten, hemmen) ab. Eine weitere in der Fachliteratur gängige Bezeichnung ist „antikatalytische Löschwirkung“.

11 Löschmittel

11.1 Löschmittel Wasser

Tab. 8: Ausgewählte Eigenschaften des Löschmittels Wasser

Eigenschaften des Löschmittels Wasser	
Chemische Formel	H ₂ O
Erscheinungsbild	farb-, geruch- und geschmacklose Flüssigkeit
Dichte	1 kg/l (größte Dichte bei 4 °C, → „Anomalie des Wassers“)
Gefrierpunkt	0 °C (bei 1013 hPa)
Siedepunkt	100 °C (bei 1013 hPa)
Elektrische Leitfähigkeit	Löschwasser: elektrisch leitend; chemisch reines Wasser: nicht elektrisch leitend
Mischbarkeit	nur mit polaren Stoffen (z. B. Alkohol) mischbar, mit unpolaren Stoffen (z. B. Benzin, Öl) nicht
Oberflächenspannung	sehr groß (nur die Oberflächenspannung von Quecksilber ist größer)

11.1.1 Löschwirkung

Wasser hat durch sein hohes Wärmebindungsvermögen bei Temperaturerhöhung und besonders bei Verdampfung eine sehr stark abkühlende Löschwirkung. Die Effektivität des Abkühlens hängt insbesondere vom Zerteilungsgrad der Wassertropfen ab.

11.1.2 Anwendung

Das Löschmittel Wasser wird standardmäßig bei Bränden der Brandklasse A eingesetzt. Hierbei unterscheidet man im Wesentlichen die Anwendungsarten Vollstrahl und Sprühstrahl.

11.1.2.1 Vollstrahl

Unter Vollstrahl versteht man die gebündelte (punktuelle) Wasserabgabe auf den Brandherd. Er wird eingesetzt, damit das Löschmittel Wasser die Glut überhaupt erreicht, durch die Auftreffwucht die Glut zerteilt und Wasser tief in das Brandgut eindringen kann.

Zur Vermeidung unnötiger Wasserschäden ist unbedingt darauf zu achten, das Wasser gezielt und dosiert abzugeben.

Vorteile der Wasserabgabe mittels Vollstrahl:

- große Wurfweite (siehe 10.1.2.3)
- große mechanische Wirkung (Auftreffwucht, Eindringtiefe)

Nachteile der Wasserabgabe mittels Vollstrahl:

- kaum abkühlenden Wirkung des Löschmittels Wasser, da verhältnismäßig wenig Wasser verdampft
- Gefahr von Wasserschäden
- Gefahr der Staubexplosion bei feinst verteilten festen glutbildenden Stoffen
- große Sicherheitsabstände im Bereich elektrischer Anlagen

11.1.2.2 Sprühstrahl

Die Wasserabgabe erfolgt beim Sprühstrahleinsatz in einer flächendeckenden, fein verteilten Form. Dadurch wird die abkühlende Wirkung besonders gut ausgenutzt, denn durch die feine Verteilung (kleine Tröpfchen) ist die Gesamtoberfläche bei gleicher Wassermenge, und damit die Voraussetzung für das Verdampfen des Wassers, wesentlich größer als beim Vollstrahl.

Demzufolge wird auch die Gefahr von Wasserschäden reduziert.

Vorteile der Wasserabgabe mittels Sprühstrahl:

- hohe abkühlende Wirkung des Löschmittels Wasser, da verhältnismäßig viel Wasser verdampft
- aufgrund der sauerstoffverdrängenden Wirkung auch begrenzt bei Flammenbränden einsetzbar
- kleinere Sicherheitsabstände bei elektrischen Anlagen
- geringere Gefahr einer Staubexplosion bei vorsichtiger Anwendung des Sprühstrahls im Bereich feinstverteilter fester glutbildender Stoffe
- Niederschlagen von Rauch, Dämpfen, schwebendem Staub etc. begrenzt möglich
- reduzierte Gefahr von Wasserschäden

Wasser kann mittels Sprühstrahl am effektivsten mit Hohlstrahlrohren abgegeben werden, weshalb im Innenangriff die Verwendung von Hohlstrahlrohren empfohlen wird.

Nachteile der Wasserabgabe mittels Sprühstrahl:

- geringere Wurfweite (siehe 10.1.2.3)
- geringere Auftreffwucht
- Gefahr von Verbrühungen durch Wasserdampfbildung in geschlossenen Räumen

11.1.2.3 Reichweiten von Strahlrohren

Die Reichweite bzw. Wurfweite kann ein Entscheidungskriterium für den Einheitsführer darstellen, welches Löschmittel bzw. welches Löschgerät das geeignetste ist. Weiterhin kann auch abgeschätzt werden, ob der Brand mit den vorhandenen Kräften beherrscht werden kann oder ob gleich weitere Einheiten nachalarmiert werden müssen.

Abb. 9 zeigt die Mindestanforderungen an die effektive Reichweite des Vollstrahls nach Norm.

Für den Sprühstrahl liegen die Werte bei ca. 35 bis 40 % der Vollstrahlwerte. Allerdings sind diese Angaben stark von dem eingestellten Sprühstrahlwinkel abhängig.

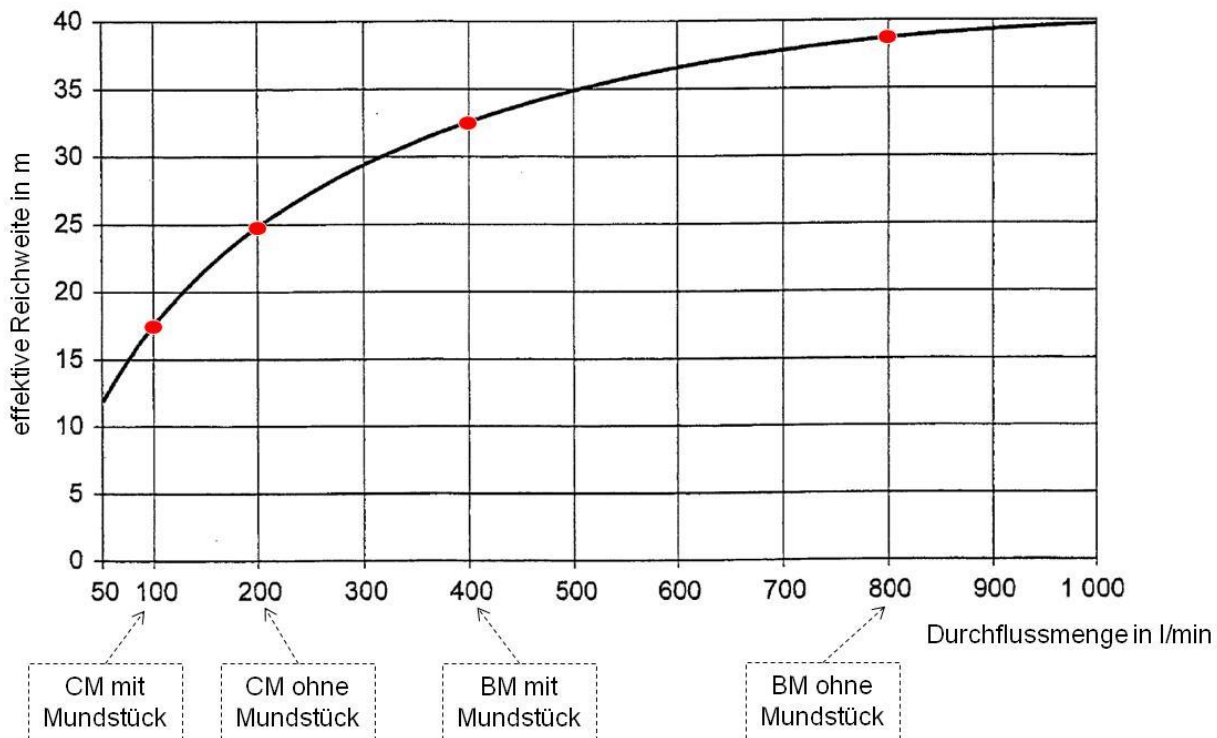


Abb. 9: Effektive Reichweite von Hohlstrahlrohren und Mehrzweckstrahlrohren (bezogen auf Vollstrahl und einen Fließdruck von 6 bar)

Als Faustformel für die Einsatzmöglichkeit einer Gruppe kann folgendes angenommen werden:

Eine Gruppe kann bei der Brandbekämpfung mit zwei C-Strahlrohren und einem B-Strahlrohr eine Gebäudelänge von 40 m (vgl. Länge eines Brandabschnittes) abdecken.

11.1.3 Anwendungsgrenzen

Das Löschmittel Wasser ist in bestimmten Einsatzsituationen nicht oder nur bedingt einsetzbar. Dabei können u. a. folgende Gefahren auftreten:

Explosion

- *bei Bränden flüssig werdender Stoffe und Fettbränden (Fettexplosion):* schlagartiges Verdampfen des Wassers, wenn dieses in hochoverhitzte Fette, Öle oder Wachse gegossen bzw. gespritzt wird
- *beim Aufwirbeln feinst verteilter Glut bildender Stoffe (Staubexplosion)*
- *bei Metallbränden (Knallgasbildung):* thermische Dissoziation (Aufspaltung) des Wassers in seine Elemente. Der Sauerstoff reagiert mit dem Metall, während der Wasserstoff mit dem Luftsauerstoff verbrennt. So kann es in manchen Fällen zur Knallgasbildung kommen.

Ausbreitung

- *bei polaren Flüssigkeiten:* Sie lassen sich prinzipiell mit Wasser löschen (Heraufsetzung des Flammpunktes). Sie können allerdings beim Löschen überlaufen und zur Brandausbreitung führen.
- *bei unpolaren Flüssigkeiten, die leichter sind als Wasser:* Das aufgebrachte Wasser sinkt ab, die brennbare Flüssigkeit schwimmt auf und kann sich brennend ausbreiten.

Einsturz

- bei saugfähigen Lagergütern (z. B. Faserstoffe, Baumwolle, Sand, Zement) und Bauteilen (z. B. Lehmdecken) als Folge der Massenzunahme durch das aufgenommene Wasser
- bei quellfähigen Lagergütern (z. B. Hülsenfrüchte, Holzfaserplatten), die dann gegen Bauteile (z. B. Silowandung) drücken
- bei Schornsteinbränden:
Ursache 1: Infolge der Wasserdampfbildung (1 l Wasser ergibt bei 100 °C etwa 1.700 l Wasserdampf) steigt der Druck schlagartig an und sprengt den Schornstein.
Ursache 2: Die plötzliche Abkühlung der heißen Bauteile führt zu Temperaturspannungen, wodurch der Schornstein aufreißen kann.

Elektrizität

Aufgrund der elektrischen Leitfähigkeit von Wasser sind im Bereich elektrischer Anlagen die in Tab. 9 aufgeführten Sicherheitsabstände einzuhalten.

Tab. 9: Sicherheitsabstände beim Einsatz von Wasser bei unter Spannung stehenden Anlagen (bezogen auf Leitungswasser und einen Fließdruck von 5 bar)

Gerät Anwendungsform	Mindestabstände zwischen Löschaustrittsöffnung und unter Spannung stehenden Anlagenteilen in m				
	bis 1 kV	bis 30 kV	bis 110 kV	bis 220 kV	bis 380 kV
CM-Strahlrohr Sprühstrahl	1	3	3	4	5
CM-Strahlrohr Vollstrahl	5	5	6	7	8
Hohlstrahlrohr C Sprühstrahl ³	1	Gefährdungsbeurteilung durch den Unternehmer bzw. Herstellerangaben			
Hohlstrahlrohr C Vollstrahl ⁴	5	Gefährdungsbeurteilung durch den Unternehmer bzw. Herstellerangaben			
BM-Strahlrohr mit Mundstück	Sicherheitsabstände wie CM-Strahlrohr zuzüglich 5 m				
BM-Strahlrohr ohne Mundstück	Sicherheitsabstände wie CM-Strahlrohr zuzüglich 10 m				

Wird bei CM-Strahlrohren der Fließdruck von 5 bar überschritten, so sind die Mindestabstände aus Tab. 9 um 2 m zu vergrößern.

Heftige Reaktion bei Kontakt mit Chemikalien

- unter Freisetzung von Wärme (z. B. mit gebranntem Kalk (Calciumoxid) oder mit Säuren)
- unter Freisetzung von brennbaren Gasen: z. B.
Wasserstoff bei der Reaktion mit Alkalimetallen (s. Kap. 4.1.4.1),
Acetylen bei der Reaktion mit Calciumcarbid

³ Quelle: Entwurf DIN VDE 0132 vom November 2014

⁴ Quelle: Entwurf DIN VDE 0132 vom November 2014

Sonstige Gefahren

- *bei Temperaturen um den Gefrierpunkt:*
Einfrierendes Wasser kann zur Zerstörung von Löschgeräten, Pumpen und Armaturen führen und erhöht die Unfallgefahr an Einsatzstellen im Winter.
- *Verbrühungsgefahr:*
Beim massiven Einsatz von Wasser in geschlossenen Gebäuden besteht diese Gefahr durch die hohen Temperaturen des entstehenden Wasserdampfes.

11.2 Löschmittel Schaum

Schaum besteht aus Luftblasen, die in einem Flüssigkeitsfilm eingeschlossen sind. Die Flüssigkeit ist ein Wasser-Schaummittel-Gemisch, welches durch Zumischung des Schaummittels zum Wasser über Dosiereinrichtungen (Zumischer oder fahrzeuggebundene, automatische Zumischanlagen) hergestellt wird.

Schaummittel lassen sich grob in zwei Klassen einteilen: Schaummittel auf **synthetischer** und auf **natürlicher** Basis.

Mit synthetischen Mehrbereichsschaummitteln, die den Tensiden von Waschmitteln entsprechen, lassen sich Schwer-, Mittel- und Leichtschaum erzeugen. Diese sind einsetzbar in den Brandklassen A und B, wobei sie in der Brandklasse A mit einer Zumischung (Zumischrate) von ca. 0,1-1 % und in der Brandklasse B mit einer Zumischrate von ca. 1-6 % eingesetzt werden. Ebenso auf synthetischer Basis hergestellt sind AFFF (A3F) Schaummittel, die als Schwerschaum oder Mittelschaum bei Zumischraten von ca. 1-6 % verwendet werden. Die Zumischraten werden von den Herstellern der Schaummittel vorgegeben. Auf natürlicher Basis, nämlich aus wasserlöslichen Eiweißprodukten hergestellt, sind die sogenannten Proteinschaummittel, die ausschließlich als Schwerschaum bei Zumischraten von 3-6 % in der Brandklasse B eingesetzt werden.

Die letztendliche Verschäumung des Wasser-Schaummittel-Gemisches durch die Zufuhr von Luft erfolgt durch die Strahlrohre (z. B. Schaumstrahlrohre), über Gebläse (z. B. Leichtschaumgeneratoren) oder durch Druckluftzufuhr (Druckluftschaum, wie z. B. CAFS = Compressed Air Foam System, Verdichtetes-Luft-Schaum-System).

11.2.1 Löschwirkung

Schaum besitzt grundsätzlich zwei Löschwirkungen: Ersticken und Abkühlen.

11.2.1.1 Kühlende Wirkung

Die kühlende Löschwirkung spielt bei Schäumen mit niedrigen Verschäumungszahlen und Bränden fester Stoffe eine entscheidende Rolle. Das im Schaum enthaltene Wasser tritt aus und entzieht dem Brandgut durch Verdampfen Wärme.

Bei Flüssigkeitsbränden verringert sich durch die kühlende Wirkung des Schaums der Dampfdruck, wodurch Gasdurchbrüche und damit Rückzündungen vermieden werden.

11.2.1.2 Erstickende Wirkung

Unter der erstickenden Löschwirkung werden mehrere Löscheffekte zusammengefasst:

Trenneffekt / Deckeffekt

Der brennbare Stoff wird durch eine geschlossene Schaumdecke von der Umgebungsluft getrennt. Sie verhindert das weitere Ausgasen brennender Stoffe, d. h. es gelangen keine brennbaren Gase mehr aus dem Brandgut in die Verbrennungszone.

Vorbeugendes Einschäumen bei ausgelaufenen und leicht ausgasenden Flüssigkeiten kann umweltbelastende Emissionen vermeiden. Gleichzeitig wird die Gefahr eines Brandausbruchs deutlich verringert.

Verdrängungseffekt

Durch Fluten von Räumen, Kanälen, Anlageteilen usw. mit Leicht- oder Mittelschaum werden der für die Verbrennung notwendige Luftsauerstoff und die brennbaren Dämpfe / Gase verdrängt.

Dämmeffekt

Durch die geringe Wärmeleitfähigkeit des Schaums wird noch nicht entzündetes oder bereits abgelöschtes Brandgut gegenüber Wärmestrahlung und Zündquellen isoliert.

11.2.1.3 Filmbildung

Insbesondere der Trenn- und der Deckeffekt können durch den Einsatz von filmbildenden Schaummitteln verbessert werden.

a) Wasserfilm (AFFF)

Aus dem Schaum heraus bildet sich ein sehr dünner, wässriger Tensidfilm (häufig als Wasserfilm bezeichnet) auf nichtpolaren Flüssigkeiten, der dem Schaum vorausseilt und ihm besonders gute Fließ-, Lösch- und rückzündungshemmende Eigenschaften verleiht. Der Wasserfilm bildet sich auch beim Einsatz der unverschäumten Schaummittellösungen, z. B. in Sprinkleranlagen, Wasserwerfern.

b) Polymerfilm (AFFF-AR, FFFP)

Der Polymerfilm entsteht beim Löschen polarer Kohlenwasserstoffe (z. B. Alkohole, Ketone, Ester) aus den im Schaum enthaltenen Polymerfilmbildnern. Der Film schwimmt als isolierende Schutzschicht zwischen dem schaumzerstörenden Alkohol und der darüber liegenden Schaumdecke. Nur bei sanfter Schaumaufgabe bildet sich ein stabiler zusammenhängender Polymerfilm, der wirksam vor der schaumzerstörenden Flüssigkeit schützt.

11.2.1.4 Übung zu den Löscheffekten

Tab. 10: Löscheffekte beim Schaumeinsatz

Löscheffekt	Ursache	Schwer-schaum	Mittel-schaum	Leicht-schaum
Dämmeffekt	Wärmeleitfähigkeit			
Kühleffekt	Wassergehalt			
Trenneffekt / Deckeffekt	Schicht- / Filmbildung			
Verdrängungseffekt	Volumen			

Tragen Sie in Tab. 10 „+++“, „++“ oder „+“ ein, je nachdem wie zutreffend der jeweilige Löscheffekt bei den verschiedenen Schaumarten ist.

11.2.2 Anwendung

11.2.2.1 Schaumarten

Welche Schaumart im Einsatz zur Anwendung kommt, entscheidet der Einheitsführer. Die drei Anwendungsarten Schwer-, Mittel- und Leichtschaum sind von der Verschäumungszahl abhängig:

- **Schwerschaum:** VZ bis 20
- **Mittelschaum:** VZ 20 bis 200
- **Leichtschaum:** VZ über 200

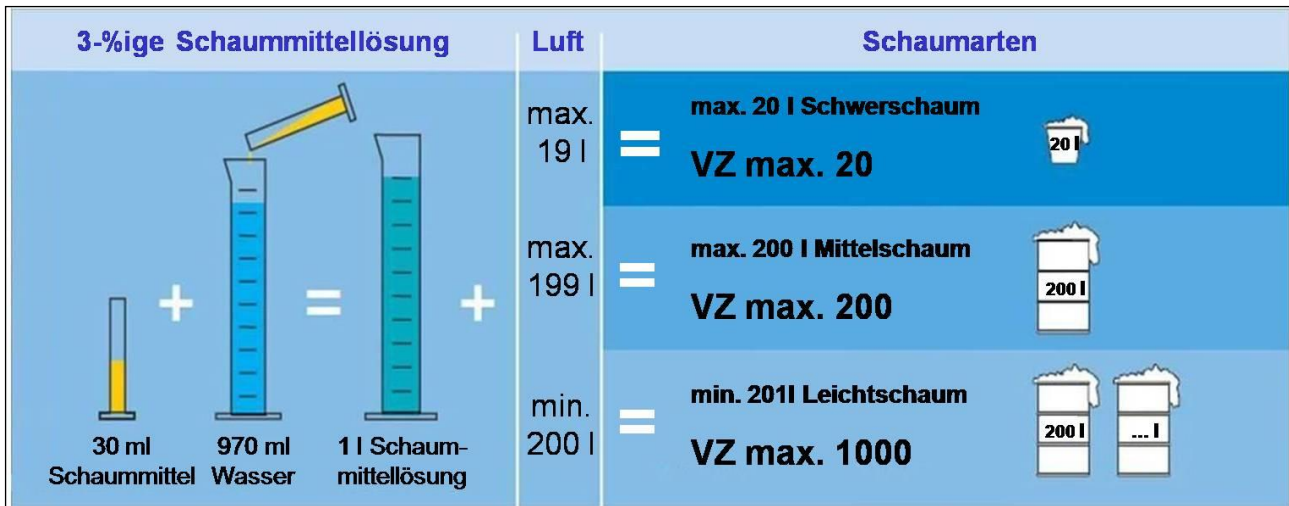


Abb. 10: Zusammensetzung des Löschmittels Schaum bei verschiedenen Schaumarten

11.2.2.2 Netzmittelanwendung

Bei einigen Feststoffbränden, wie z. B. bei Schüttgut, Waldboden, Dämmmaterialien, Stäuben, Textil-, Papier- oder Strohballen, läuft das Wasser über die Oberfläche ab. Durch die Zumischung von Schaummittel wird die Oberflächenspannung des Wassers herabgesetzt, so dass ein Eindringen in diese Materialien verbessert wird und das Wasser auch im Innern dieser Stoffe seine kühlende Wirkung entfalten kann. Die Zumischrate für herkömmliches Mehrbereichsschaummittel liegt, abhängig vom Brandgut, dem Zumischsystem und den Angaben des Herstellers zwischen 0,1 und 2 %.

11.2.2.3 Ermittlung der benötigten Schaummittelmenge

Eine für den Einsatzleiter wichtige Fragestellung ist die nach der ausreichenden Schaummittelmenge. Ein Schaumangriff ist nur dann sinnvoll und hat Aussicht auf Erfolg, wenn, neben dem notwendigen Wasser, ausreichend Schaummittel verfügbar ist.

Welche löschwirksame Schaummengende lässt sich mit dem Schaummittelvorrat eines Löschgruppenfahrzeuges herstellen und welche Fläche einer brennenden Flüssigkeit lässt sich damit beherrschen?

Folgende Randbedingungen sind gegeben:

- Zumischrate: ZR = 3 %
- Zumischer: Z4R
- Schwerschaumrohr S4: VZ = 10
- Löschwassermenge: unbegrenzt
- Schaummittelvorrat: 120 Liter

Eine Zumischrate von 3 % bedeutet:

3 l Schaummittel auf 100 l Wasser-Schaummittel-Gemisch oder

12 l Schaummittel auf 400 l Wasser-Schaummittel-Gemisch* oder

120 l Schaummittel auf 4.000 l Wasser-Schaummittel-Gemisch

(*Anmerkung: Bei einem Durchfluss von 400 l/min wird deutlich, dass bereits nach einer Minute 12 l Schaummittel zugemischt wurden. Ein Schaummittelkanister mit 20 l Inhalt liefert also für ca. 1min 40 sec Schaum.)

Bei einer Verschäumungszahl von $VZ = 10$ lassen sich mit den 4.000 Litern Wasser-Schaummittel-Gemisch also $40.000\text{l} = 40\text{ m}^3$ Schaum erzeugen. Dies entspricht einer Fläche von 40 m^2 , die 1 m hoch eingeschäumt werden kann.

Geht man von einer Zerstörung von 50 % des Schaums infolge weiter unten beschriebener Einflüsse aus, verringert sich die Schaummenge auf 20 m^3 und die Schaumhöhe auf 0,5 m bei gleichbleibender Fläche von 40 m^2 . Wenn man konservativ abschätzt, dass eine effektive Schaumhöhe von 0,3 m ausreichend ist, vergrößert sich die Fläche bei gleichem Schaumvolumen von 20 m^3 auf ca. 60 m^2 .

Mit einer Schaummittelmenge von 120 Litern lässt sich also eine Fläche von 60 m^2 erfolgversprechend einschäumen. Dies führt zu folgender Faustformel zur überschlägigen Ermittlung des Schaummittelbedarfs:

Pro m^2 brennende Fläche werden 2 Liter Schaummittel benötigt.

Abweichungen bezüglich des tatsächlichen Schaummittelbedarfs an Einsatzstellen können in Abhängigkeit vom brennbaren Stoff und den zur Verfügung stehenden Schaummitteln aber durchaus möglich sein.

11.2.2.4 Ermittlung der Anzahl der Schaumstrahlrohre (Aufbringrate)

Die zweite für den Einsatzleiter wichtige Frage ist die nach der Anzahl der einzusetzenden Schaumstrahlrohre. Diese kann beantwortet werden, wenn bekannt ist, wie groß bei dem jeweiligen Brandherd die Löschintensität, also die pro Minute aufgebrachte Menge an Wasser-Schaummittel-Gemisch sein muss. Diese Anwendungsrate des Löschmittels wird als Aufbringrate bezeichnet. Ist die Aufbringrate zu gering, verzögert sich der Löscherfolg oder bleibt ganz aus.

Aufbringraten werden von den Schaummittelherstellern vorgegeben.

Tab. 11 zeigt die mittleren Aufbringraten auf Benzin in Abhängigkeit vom verwendeten Schaummittel.

Tab. 11: Aufbringraten für Benzin

Schaummittel	Abkürzung	Aufbringrate in $\text{l/min} \cdot \text{m}^2$
Protein-Schaummittel	PS	4
Mehrbereichsschaummittel	MBS	4
Fluor-Protein-Schaummittel	FPS	3
Wasserfilmbildendes Schaummittel	AFFF	3
AFFF alkoholbeständig	AFFF-AR	2

Die Ermittlung der notwendigen Schaumstrahlrohre erfolgt dann durch Multiplikation der Aufbringrate mit der Größe der brennenden Fläche:

Brennt z. B. Benzin auf einer Fläche von $10\text{ m} \cdot 10\text{ m} = 100\text{ m}^2$ und soll diese mit Mehrbereichsschaummittel gelöscht werden, ergibt sich folgende Rechnung:

Fläche \cdot Aufbringrate = $100\text{ m}^2 \cdot 4\text{ l/min} \cdot \text{m}^2 = 400\text{ l/min}$

Das Ergebnis bedeutet, dass ein Löschmittelstrom von 400l/min gewährleistet werden muss. Hierzu würde also ein S4-Schaumstrahlrohr ausreichen.

Bei einer größeren brennenden Fläche reicht ein S4-Schaumstrahlrohr nicht mehr aus. Es müssten dann zwei S4- oder ein S8-Schaumstrahlrohr eingesetzt werden.

Für andere brennbare Stoffe gelten folgende Mindestaufbringraten:

Tab. 12: Faustwerte für Aufbringraten bei verschiedenen brennbaren Stoffen

Brennbarer Stoff	Mindestaufbringrate in l/min•m ²
unbekannte Flüssigkeit	8
Flüssigkeitsfläche ab 200m ²	8
Tankbrände unpolar	10
Tankbrände polar	20
Feststoffbrände bis 200m ²	4
Feststoffbrände ab 200m ²	8

Die in den Tabellen 11 und 12 angegebenen Werte sind Mindestwerte und so schnell es geht zu überschreiten, bei der Brandklasse B keinesfalls zu unterschreiten!

11.2.2.5 Anwendungshinweise

Weitere wichtige Anwendungshinweise für das Löschmittel Schaum sind:

- ⇒ Den gesamten Schaummittelvorrat am Zumischer bereit stellen und alle Kanister aufschrauben!
- ⇒ Den Schaumstrahl erst dann zur Brandbekämpfung einsetzen, wenn der Schaum die gewünschte Konsistenz hat!
- ⇒ Am Schaumstrahlrohr nur saubere Luft ansaugen!
- ⇒ Gerätschaften nach dem Einsatz gründlich reinigen!
- ⇒ Geringere Wurfweiten im Vergleich zu Wasser beachten
Mindestwurfweite Schwertschaumrohr S4: 20 m
Mindestwurfweite Mittelschaumrohr M4: 7 m
- ⇒ Einsatz von Wärmeschutzkleidung prüfen!

11.2.2.6 Direkte und indirekte Beschäumung

Bei der Brandbekämpfung mit Schaum ist vom Strahlrohrführer darauf zu achten, dass der Schaum richtig aufgebracht wird. Soll ein Feststoffbrand mit Schaum gelöscht werden, so wird das Brandgut direkt mit dem Schaum abgedeckt.

Wird hingegen eine brennende Flüssigkeit mit Schaum gelöscht, so muss der Schaum indirekt aufgegeben werden: Über eine Hilfsfläche, z. B. die Geländeoberfläche, eine Behälterwand oder eine andere geeignete Fläche, wird der Schaum abseits der brennenden Fläche an einer Stelle aufgetragen und breitet sich von hier aus über die brennende Flüssigkeit aus. Eine direkte Schaumaufgabe hätte eine Zerstörung des Schaums zur Folge, da der Schaum in die brennende Flüssigkeit eintauchen und beim Auftauchen an der Oberfläche verbrennen würde.

11.2.3 Anwendungsgrenzen

Beim Einsatz des Löschmittels Schaum sind u.a. folgende Punkte zu beachten:

Schaumzerstörung

An der Einsatzstelle hergestellter Schaum wird durch verschiedene Einflussfaktoren zerstört:

*Wärme
andere Löschmittel
mechanische Einflüsse
Chemikalien
Wasserhalbzzeit*

Elektrische Leitfähigkeit

Der von der Feuerwehr an der Einsatzstelle hergestellte Schaum ist in der Regel elektrisch leitfähig und darf daher bei unter Spannung stehenden Anlagen nicht eingesetzt werden. Wird z. B. ein Raum mit Schaum geflutet, in dem ein spannungsführender Leiter frei liegt und mit dem Schaum in Berührung kommt, wird das gesamte Schaumvolumen unter Spannung gesetzt und kann die Einsatzkräfte, die mit ihm in Kontakt kommen, in Gefahr bringen. Manche stationären Schaumlöschanlagen stellen mit Spezialschaummittel und destilliertem Wasser nicht leitfähigen Schaum her.

Der Entwurf der DIN VDE 0132 vom November 2014 sieht bei Abgabe von Druckluftschaum mit CM- bzw. Hohlstrahlrohren in Niederspannungsanlagen Mindestabstände von 1 m (Sprühstrahl) und 5 m (Vollstrahl) vor.

Außerdem wird in dem DIN-Entwurf darauf hingewiesen, dass anhaftender Schaum an unter Spannung stehenden Teilen zu Spannungsverschleppungen führt und die Einsatzkräfte über einen damit in Verbindung stehenden Schaumteppich gefährdet werden können.

Gefahr von chemischen Reaktionen und Verunreinigungen

Insbesondere Schwerschaum sollte nicht bei solchen brennbaren Stoffen eingesetzt werden, bei denen Wasser gefährliche chemische Reaktionen (z. B. Leichtmetallbrände etc.) hervorruft. Empfindliche Lagergüter können durch die Verwendung von Schaum erheblich verunreinigt werden.

Gegendruckempfindlichkeit

Bei der Verwendung von Z-Zumischern ist zu beachten, dass diese nur bis zu einem bestimmten Gegendruck arbeiten. Der Druckverlust zwischen Zumischer und Schaumstrahlrohr darf nach DIN 14384 nicht größer als 2 bar sein. Wegen dieser Gegendruckempfindlichkeit ist die Schaumabgabe über Drehleitern (Druckverlust: max. Höhe 30 m \triangleq 3 bar und Druckverlust im 35 m langen B-Schlauch) häufig mit Schwierigkeiten verbunden. Eine Abstimmung von Maschinist und Strahlrohrführer, der den Strahlrohreingangsdruck am Schaltorgan des Schaumstrahlrohres ablesen kann, ist deshalb bei diesen Einsätzen notwendig.

Windeinfluss

Bei relativen hohen Verschäumungszahlen ($VZ > 150$) und Windstärken über 6 (Beaufort-Skala) muss damit gerechnet werden, dass der erzeugte Schaum fortgeweht wird.

Erstickungsgefahr beim Fluten von Räumen

Vor dem Fluten von Räumen ist sicherzustellen, dass sich keine Einsatzkräfte darin befinden, weder ohne noch mit Atemschutz. Bei diesen können wichtige Bauteile, welche die Luftversorgung sicherstellen, verkleben und somit versagen.

Einleitung von Schaum in offene Gewässer verhindern

Da Schaummittel zu den wassergefährdenden Stoffen gehören und somit schädlich auf Wasserlebewesen wirken, soll nach Möglichkeit eine Einleitung von Wasser-Schaummittel-Gemischen in offene Gewässer wie Bäche, Flüsse, Teiche oder Seen z. B. durch Löschwasserrückhaltung verhindert werden.

11.3 Löschmittel Pulver

Mit Ausnahme der Brandklasse F wird das Löschmittel Pulver für alle Brandklassen eingesetzt. Löschpulver wird vorwiegend in tragbaren Feuerlöschern verwendet, aber auch in fahrbaren Löschgeräten, ortsfesten Anlagen und Löschmittelbehältern von Feuerwehrfahrzeugen wird es vorgehalten.

Pulverlöscher werden in den Brandklassen A, B, C und D als ABC-Pulverlöscher, BC-Pulverlöscher und D-Pulverlöscher eingesetzt.

ABC-Löschpulver (Glutbrandlöschpulver) und BC-Löschpulver

Während ABC-Löschpulver vorwiegend aus Ammoniumverbindungen (ähnlich Düngemitteln) wie z. B. Ammoniumphosphat besteht, sind die Grundsubstanzen für BC-Pulver Natriumhydrogencarbonat (ähnlich Backpulver) und Kaliumhydrogencarbonat. Es handelt sich in beiden Fällen um farblose Pulver, die zur Kennzeichnung von den Herstellern eingefärbt werden. Die Farben erlauben jedoch keine Rückschlüsse auf den generellen Löschpulvertyp.

In ihren allgemeinen physikalischen Eigenschaften weichen die BC-Löschpulver nur unwesentlich von den ABC-Pulvern ab. Korngröße und spezifische Oberfläche stimmen oft überein.

D-Löschpulver (Metallbrandpulver)

Das D-Löschpulver besteht in den meisten Fällen aus Alkalichloriden, wie z. B. Natriumchlorid (Kochsalz).

Metallbrandpulver unterscheidet sich nicht in den physikalischen Eigenschaften von den anderen Pulversorten, sondern nur in seiner Wirkungsweise.

11.3.1 Löschwirkung

Die Löschwirkungen sind je nach Pulverart verschieden.

11.3.1.1 Löschwirkung des ABC-Löschpulvers und BC-Löschpulvers

Das ABC-Löschpulver und das BC-Löschpulver haben eine reaktionshemmende (inhibierende) Wirkung auf Flammen. Die Hauptlöschwirkung bei Flammenbränden beruht auf der Reaktionshemmung (heterogenen Inhibition) durch den sogenannten Wandeffekt. Dieser wird durch die große Gesamtoberfläche der Pulverteilchen ($1 \text{ kg} = 130\text{-}390 \text{ m}^2$) realisiert. Des Weiteren kommt es zu einer erstickenden Wirkung durch Verdünnen der Sauerstoffkonzentration.

Bei Bränden der Brandklasse A hat das ABC-Löschpulver eine erstickende Wirkung durch Trennen. Durch Schmelzen bzw. Zersetzen des Löschpulvers ab ca. 70 °C entstehen Salzschnmelzen, die in die Poren fester Brennstoffe fließen und an der Oberfläche Sinterschichten bilden, wodurch das Eindringen von Sauerstoff verhindert wird.

11.3.1.2 Löschwirkung des D-Löschpulvers

Bei dem Einsatz des D-Löschpulvers sintern bzw. schmelzen hochtemperierte Salze. Es kommt zu einer starken Glasurbildung. Durch den Stickeffekt der Krustenbildung ist keine Luftsauerstoffdurchdringung mehr möglich. Je nach Art des Brandguts kann das Verlöschchen unterschiedlich lange dauern. Eine zu frühzeitige Kontrolle, ob ein Löscherfolg erzielt wurde und damit einhergehend die teilweise Zerstörung der Glasur-Kruste, muss unbedingt vermieden werden.

11.3.2 Anwendung

Große Vorteile, insbesondere des ABC-Pulvers, sind seine vielseitige Verwendbarkeit und seine schnelle Wirksamkeit bei Flammenbränden.

Ein ABC-Löscher kann bei praktisch allen auftretenden Bränden eingesetzt werden. Insbesondere in der Entstehungsphase können auch Laien bei richtiger Handhabung der Löscher sehr schnell Löscherfolge erzielen.

Wichtige Einsatzbereiche von ABC-Löschpulver sind z. B. Heizungsanlagen, Lagerräume, Werkstätten; also Objekte, bei denen das Brandrisiko der drei Brandklassen ABC abgedeckt werden muss. Treten nur Stoffe der Brandklasse B und C auf, genügt BC-Pulver.

Bei Bränden der Brandklasse A werden die erstickend wirkenden Salzschnmelzen am ehesten gebildet, wenn man versucht eine möglichst geschlossene Pulverschicht zu erzeugen. Hierbei kann es von Vorteil sein, kurze, weiche Pulverstöße auf den Brandherd abzugeben.

Flammenbrände der Brandklassen B und C (sofern ein Löschen von Gasbränden einsatztaktisch sinnvoll ist) erfordern eine komplette Durchmischung des abgegebenen Pulvers mit den Flammen. Daher sollten die Flammen mit einer weichen Pulverwolke möglichst komplett eingehüllt werden. Eine Unterbrechung der Pulverabgabe kann den Löscherfolg gefährden.

Bei Metallbränden wird das D-Pulver mit einer speziellen Pulverbrause weich und drucklos auf das Metall bzw. die Metallschnmelze aufgegeben. Diese vorsichtige Abgabe des Pulvers ist zwingend notwendig, damit sich eine zusammenhängende, luftdichte Sinterschicht ausbilden kann.

Zur Abschätzung des Löscherfolges und der notwendigen Löschmittelmenge kann man aus der DIN EN 3 (Löschvermögen von tragbaren Feuerlöschern mit ABC-Pulver) folgende Faustformeln ableiten:

Einsatz von ABC-Pulver in der Brandklasse A:

10 kg ABC-Pulver für ca. 1 m³ Volumen

Einsatz von ABC-Pulver in Brandklasse B:

10 kg ABC-Pulver für ca. 5 m² Fläche

11.3.3 Anwendungsgrenzen

Beim Einsatz des Löschmittels Pulver sind u. a. folgende Punkte zu beachten:

Größe des Brandherdes

Generell ist Löschpulver, soweit für die jeweilige Brandklasse zugelassen, für alle Brände einsetzbar. Es gilt zu beachten, dass der Löscherfolg nur bei einer ausreichend großen Löschpulverwolke eintritt.

Begrenzter Löschmittelvorrat

Der Löschmittelvorrat ist meistens begrenzt, so dass bei ausgedehnten Bränden der Löschpulvervorrat nicht ausreicht.

Geringe Reichweiten

Beim Einsatz von Löschpulver sind die Reichweiten gering.

Rückzündungsgefahr

Die Gefahr der Rückzündung ist aufgrund mangelnder Kühlwirkung zu berücksichtigen.

Sichtbehinderung

Beim Einsatz von Pulver kommt es zu starken Sichtbehinderungen.

Wechselwirkung mit anderen Löschmitteln

Vorsicht ist beim kombinierten Einsatz mit Löschschaum geboten: Viele Pulver zersetzen den Schaum schnell und nachhaltig. Generell sind Pulverlöschmittel nicht schaumverträglich, nur die Pulver mit der Zusatzbezeichnung SV sind schaumverträglich.

Folgeschäden

Wegen seiner Eigenschaften als Salzgemisch kann es durch diese Ablagerungen in Verbindung mit (Luft-) Feuchtigkeit zu starken Korrosionsschäden kommen. Diese Korrosionsschäden treten manchmal erst nach mehreren Wochen oder Monaten auf, je nach Luftfeuchtigkeit und Menge des Löschpulvers.

Ebenso sind die starke Verunreinigung durch Löschpulver und der damit verbundene enorme Reinigungsaufwand zu bedenken.

Elektrizität

Folgende Sicherheitsabstände beim Einsatz von Pulver in unter Spannung stehenden Anlagen sind zu beachten.

Tab. 13: Sicherheitsabstände beim Einsatz von Löschpulver bei unter Spannung stehenden Anlagen

Brandklassen Löschpulverart	Mindestabstände zwischen Löschaustrittsöffnung und unter Spannung stehenden Anlagenteilen in m	
	Niederspannung (bis 1 kV)	Hochspannung (bis 380 kV)
BC-Löschpulver	1	5
ABC-Löschpulver	1	nur in spannungsfreien Anlagen
D-Löschpulver	1	nur in spannungsfreien Anlagen

11.4 Löschmittel Kohlenstoffdioxid

Tab. 14: Ausgewählte Eigenschaften des Löschmittels Kohlenstoffdioxid

Eigenschaften des Löschmittels Kohlenstoffdioxid	
Chemische Formel	CO ₂
Erscheinungsbild	farb- und geruchloses Gas, das leicht säuerlich schmeckt
Dichte	1,96 kg/m ³ (Dichteverhältnis zu Luft: 1,52)
Elektrische Leitfähigkeit	nicht leitend
Lagerung	verflüssigt in Druckgasflaschen bei 75 bar oder tiefkalt bei geringem Druck

11.4.1 Löschwirkung

Die Löschwirkung von Kohlenstoffdioxid beruht auf dem Ersticken durch Verdünnen. Ein verwertbarer Kühleffekt ist selbst dem festen CO₂-Schnee nicht zuzuschreiben, da die Sublimation so langsam abläuft, dass keine Kühlwirkung eintritt.

Kohlenstoffdioxid ist ca. 1,5mal schwerer als Luft und verdrängt so den Sauerstoff der Luft von unten. Dieser Verdrängungseffekt hält allerdings nicht lange vor, da Kohlenstoffdioxid bei Temperaturen von über 165 °C spezifisch leichter als Luft wird und sich somit aus der Verbrennungszone entfernt. Die Löschwirkung ist daher nur kurzzeitig, wenn nicht bestimmte Mindestkonzentrationen an Kohlenstoffdioxid im Brennstoff-Luft-Gemisch erreicht werden, die bei ca. 30 Vol.-% liegen. Dies kann technisch nur innerhalb von geschlossenen Räumen gelingen.

11.4.2 Anwendung

Kohlenstoffdioxid findet aufgrund seiner Löschwirkung hauptsächlich bei reinen Flammenbränden in den Brandklassen B und C Anwendung.

Es hinterlässt praktisch keine Rückstände und wird deshalb besonders in Bereichen eingesetzt, in denen andere Löschmittel hohe Schäden anrichten würden (z. B. in elektrischen Anlagen, Laboren, Küchen).

Kohlenstoffdioxid wird mit Hilfe von tragbaren Feuerlöschern, fahrbaren Löschgeräten oder ortsfesten Löschanlagen als

CO₂-Schnee,
CO₂-Nebel oder
CO₂-Gas

eingesetzt.

Kohlenstoffdioxidschnee wird in einer Schneedüse (Schneerohr), die den Zutritt von Wärme und Luft verhindert, erzeugt. Er eignet sich besonders zum Löschen kleinerer Flüssigkeitsbrände.

Kohlenstoffdioxidnebel ist eine Weiterentwicklung des Kohlenstoffdioxidschnees und besteht aus einem Gemisch von feinstem Schnee und Gas. Auf Grund der guten Handlichkeit der Nebeldüse und des weich austretenden Löschstrahls wird CO₂-Nebel vornehmlich in Laboren, EDV-Anlagen, Apotheken usw. verwendet.

Kohlenstoffdioxidgas wird direkt aus der Gasphase entnommen und tritt demnach mit vollem Flaschendruck und hoher Geschwindigkeit aus. Somit eignet es sich besonders zum Löschen von Gasbränden.

Zur Abschätzung des Löschmittelbedarfs kann folgende Faustformel angewendet werden:

Pro m³ zu löschender Raum wird 1 kg CO₂ benötigt.

11.4.3 Anwendungsgrenzen

Beim Einsatz des Löschmittels Kohlenstoffdioxid sind u. a. folgende Punkte zu beachten:

Atemgift

Kohlenstoffdioxid ist in höheren Konzentrationen ein Atemgift mit Wirkung auf Blut, Nerven und Zellen. Ab einer Konzentration von 3-4 Vol.-% reagiert der menschliche Körper mit einer erkennbaren Steigerung der Atemfrequenz. Wird eine Konzentration von 6-8 Vol.-% erreicht, können Ohnmacht, Krämpfe und Atemstillstand eintreten. Löschwirksame Konzentrationen von 30 Vol.-% und mehr führen innerhalb von Sekunden zur Bewusstlosigkeit und nach wenigen Minuten zum Tod.⁵

Brände von Metallen und stark Glut bildenden Stoffen

Ähnlich wie bei Wasser setzt auch bei Kohlenstoffdioxid bei hohen Temperaturen die thermische Dissoziation (Aufspaltung) ein. Der entstehende Sauerstoff fördert zusätzlich die Verbrennung.

Fehlende Kühlwirkung

Durch den Brand aufgeheizte Teile (z. B. Behälterwände) können nicht abgekühlt und somit Rückzündungen und erneute Entflammungen nicht verhindert werden.

Erfrierungen

Kohlenstoffdioxidschnee ruft bei längerem Kontakt mit der Haut „Verbrennungen“ hervor.

Elektrostatische Aufladung

Kohlenstoffdioxid neigt bei der Expansion zur elektrostatischen Aufladung. Die Entladung der statischen Elektrizität kann Funkenüberschläge erzeugen, die explosionsfähige Atmosphären zünden können.

Elektrische Anlagen

Im Bereich von unter Spannung stehenden Anlagen sind die Sicherheitsabstände gemäß Tab. 15 einzuhalten.

Tab. 15: Sicherheitsabstände beim Einsatz von Kohlenstoffdioxid bei unter Spannung stehenden Anlagen

	Mindestabstände zwischen Löschaustrittsöffnung und unter Spannung stehenden Anlagenteilen in m				
	bis 1 kV	bis 30 kV	bis 110 kV	bis 220 kV	bis 380 kV
Kohlenstoffdioxid	1	3	3	4	5

Sonstiges

Kohlenstoffdioxid ist im Freien praktisch unwirksam und kann insbesondere bei Verwendung von Feuerlöschern nur mit geringen Wurfweiten angewendet werden.

⁵ Quelle: G. Rodewald / A. Rempe, „Feuerlöschmittel“

11.5 Fettbrandlöschmittel

Fettbrandlöschmittel sind wässrige Lösungen mit speziellen Additiven, die je nach Hersteller eine unterschiedliche Farbe aufweisen können und vom Geruch her spezifisch sind. Fettbrandlöschmittel sind in der Regel physiologisch unbedenklich, biologisch gut abbaubar und unbegrenzt in Wasser löslich. Bei bestimmungsgemäßer Anwendung sind keine gesundheitlichen Bedenken zu erwarten.

11.5.1 Löschwirkung

Durch chemische Reaktion des Fettbrandlöschmittels mit den Speiseölen und -fetten entsteht eine geschlossene, gasdichte Schaumdecke (Ersticken durch Trennen).

Ferner wird den Speiseölen und -fetten sowie deren Umgebung Wärme entzogen. Diese abkühlende Wirkung reduziert die Gefahr von Rückzündungen.

11.5.2 Anwendung

Das Löschmittel wird flüssig über Sprühdüsen fein verteilt auf das brennende Speisefett bzw. -öl aufgebracht.

Das Fettbrandlöschmittel ist primär für den Einsatz bei Bränden der Brandklasse F gedacht, kann aber je nach Herstellerangaben auch für Brände der Brandklassen A und B genutzt werden.

Fettbrandlöschmittel werden in tragbaren Feuerlöschern sowie in ortsfesten Löschanlagen eingesetzt.

Die Wurfweite eines Fettbrandlöschers beträgt nach Herstellerangaben bis zu 4 m.

11.5.3 Anwendungsgrenzen

Beim Einsatz des Fettbrandlöschmittels sind u. a. folgende Punkte zu beachten:

Brände von Metallen und Gasen

Hier zeigt das Fettbrandlöschmittel keine Wirkung. Ganz im Gegenteil: Bei hohen Brandtemperaturen kann auch hier das im Löschmittel enthaltene Wasser dissoziieren und den Brand beschleunigen.

Atemgifte

Werden größere Mengen von brennendem Speisefett bzw. -öl gelöscht, ist mit einer starken Rauchentwicklung und dem Auftreten gesundheitsgefährlicher Stoffe zu rechnen.

Elektrizität

Im Bereich von unter Spannung stehenden Anlagen sind die Sicherheitsabstände gemäß Tab. 16 einzuhalten.

Tab. 16: Sicherheitsabstände beim Einsatz von Fettbrandlöschmitteln bei unter Spannung stehenden Anlagen

	Mindestabstände zwischen Löschaustrittsöffnung und unter Spannung stehenden Anlagenteilen in m	
	Niederspannung (bis 1 kV)	Hochspannung (über 1 kV)
Fettbrandlöschmittel	1	nur in spannungsfreien Anlagen

Umherspritzen

Beim Aufbringen des Fettbrandlöschmittels kann es kurzzeitig zum Umherspritzen von heißen Fetttropfen kommen bis die Löschwirkung eintritt. Aus diesem Grund sollte, wenn möglich, auf jeden Fall ein größerer Sicherheitsabstand (ca. 2 m) eingehalten werden.

11.6 Sonstige Löschmittel

11.6.1 Inertgase

Als inert werden Stoffe bezeichnet, die von sich aus nicht zu chemischen Reaktionen neigen. Als Löschmittel haben sich insbesondere Stickstoff, Argon und Inergen (eine Mischung aus 52 Vol.-% Stickstoff, 40 Vol.-% Argon und 8 Vol.-% Kohlenstoffdioxid) etabliert.

Sie löschen wie Kohlenstoffdioxid durch Verdünnen des Luftsauerstoffes und werden in stationären Löschanlagen eingesetzt.

11.6.2 Halone

Halone sind wie die FCKWs halogenierte Kohlenwasserstoffverbindungen. Diese sind jedoch auf Grund ihrer Giftigkeit und ozonschichtschädigenden Wirkung seit dem 01.01.1992 verboten.

Halone haben eine schlagartige reaktionshemmende Löschwirkung (homogene Inhibition), auch schon bei niedrigen Konzentrationen (4-5 % in Luft).

Deshalb finden sie heute nur noch mit besonderer Erlaubnis in speziellen Bereichen beim Militär und der Luftfahrt Verwendung.

11.6.3 Chemische Löschgase

Als Ersatzstoffe für die verbotenen Halogene wurden andere halogenierte Kohlenwasserstoffverbindungen entwickelt, die allerdings die schädigenden Eigenschaften der Halone nicht aufweisen.

Sie löschen wie die Halone durch Hemmen der Reaktion und werden in stationären Löschanlagen eingesetzt.

Handelsnamen der Gase sind z. B. FM 200TM oder NovecTM 1230.

12 Quellenverzeichnis

1. Hessische Landesfeuerwehrschule
Abb. 1 bis 8
Tab. 1, 8, 10, 14
2. F. Tretzel, „Formeln, Tabellen und Wissenswertes für die Feuerwehr“
Tab. 2, 3, 7
3. G. Rodewald, „Brandlehre“
Tab. 2
4. Nabert / Schön / Redeker, „Sicherheitstechnische Kenngrößen brennbarer Gase und Dämpfe“
Tab. 4
5. K.-H. Knorr, „Die Gefahren der Einsatzstelle“
Tab. 5
6. ATEX Richtlinie 94/9/EG
Tab. 6
7. DIN EN 15182
Abb. 9
8. DIN VDE 0132
Tab. 9, 13, 15
9. Dr. Sthamer
Abb. 10
10. Feuerwehr Magazin, Sonderheft „Brandbekämpfung mit Schaum“
Tab. 11, 12
11. K. Klingsohr, „Verbrennen und Löschen“
Tab. 14
12. G. Rodewald / A. Rempe, „Feuerlöschmittel“
Tab. 14
13. Gloria
Tab. 16