
2.1 Definitionen und allgemeiner Verbrennungsvorgang

Bevor es möglich ist auf die Brandbekämpfung einzugehen ist es erst notwendig, das „Brennen“ an sich zu verstehen. Daher wird in diesem Kapitel im Detail auf den Verbrennungsvorgang eingegangen.

Die Begriffe Feuer und Brand werden umgangssprachlich meist gleichgesetzt und auch in der Fachliteratur scheint keine Einigung in der Definition zu existieren. Dennoch wird hiermit versucht die relevantesten Begrifflichkeiten des Verbrennungsvorgangs eindeutig zu erklären, um eine Verwendung derer zu ermöglichen.

- *Feuer* ist die Bezeichnung für die sichtbare äußere Begleiterscheinung einer Verbrennung (Flammen, Glut, ...) (vgl. *Kemper, Brennen und Löschen, S. 13*).
- Als *Brand* hingegen wird Schadfeuer (im Gegensatz zu Nutzfeuer – eine gewollte, kontrollierte Verbrennung an einem vorbestimmten Ort), also nichtbestimmungsgemäßes Brennen bezeichnet (vgl. *Gisbert Rodewald, Brandlehre, S. 9*).

- *Brennen* oder *Verbrennen* bzw. die *Verbrennung* ist per Definition einfach die Bezeichnung für eine exotherme Oxidation mit Feuererscheinung, d. h. die chemische Reaktion brennbarer Stoffe mit einem Oxidationsmittel (meist Sauerstoff) zu neuen chemischen Stoffen (Oxiden) (vgl. Kurt Klingsohr, *Verbrennen und Löschen*, S. 7ff.).

Eine solche *Oxidation* kann auch langsam und ohne Feuererscheinung ablaufen, dann nennt man sie gären, rosten, faulen oder verwesen (vgl. Kemper, *Brennen und Löschen*, S. 12).

Genau genommen ist eine Oxidation an sich, zusammen mit der Reduktion, eine Teilreaktion der *Redoxreaktion*, welche u. a. eine Reaktion brennbarer Stoffe mit Sauerstoff darstellt. Die Oxidation läuft unter Abgabe von Elektronen ab, wobei sich die Oxidationszahl erhöht, wohingegen die Reduktion unter Aufnahme von Elektronen abläuft, weswegen man den oxidierten Stoff, das Reduktionsmittel, auch Elektronendonator und den reduzierten Stoff, das Oxidationsmittel, auch Elektronenakceptor nennen kann. Je größer die Elektronegativität des Oxidationsmittels, desto besser kann das Reduktionsmittel oxidiert werden, weshalb auch die meisten Oxidationen Sauerstoff als Oxidationsmittel verwenden, da Sauerstoff nach Fluor die zweitgrößte Elektronegativität (3,5) besitzt. Jedoch können Oxidationen, beispielsweise, auch unter Fluor, Chlor oder Brom ablaufen (vgl. Gisbert Rodewald, *Brandlehre*, S. 119ff.).

Die wichtigsten *Erscheinungsformen* von Feuer sind Flammen und Glut. Je nach Aggregatzustand der Stoffe treten entweder Flammen oder Glut oder beides auf, so verbrennen Gase, flüssige Stoffe (brennen in Dampfform) und flüssig werdende Stoffe (z. B. Wachs, Fett, Harz, Thermoplaste) nur unter Flammen, entgaste organische Stoffe (z. B. Koks) und Metalle nur mit Glut und feste Stoffe (hauptsächlich organische Naturprodukte wie z. B. Holz, Papier, Faserstoffe), die sich in gasförmige Stoffe und festen Kohlenstoff zersetzen mit Flammen und Glut. Sowohl Flammen, als auch Glut sind Erscheinungsformen der, bei der Reaktion, entweichenden Wärmeenergie. Wobei die Flamme ein brennender licht- und wärmeemittierender Gas-/Dampfstrom ist, in dem sogenannte Radikalreaktionen ablaufen und die Glut (Glühen, Glimmen) die ins sichtbare Licht übergehende Wärmestrahlung darstellt (ab ca. 400 °C wandert die Wärmestrahlung vom Infrarot- in den sichtbaren Bereich; ab ca. 1500 °C wird zusätzlich UV-Strahlung ausgesandt). Aufgrund dessen kann auch

Tab. 2.1 Glutbild in Abhängigkeit von der Temperatur. (Vgl. Kurt Klingsohr, *Verbrennen und Löschen*, S. 13)

Temperatur	Glutbild
400 °C	Grauglut
700 °C	Rotglut
900 °C	Helle Rotglut
1100 °C	Gelbglut
1500 °C	Weißglut

durch die Farbe der Glut auf die Temperatur geschlossen werden (vgl. Kurt Klingsohr, *Verbrennen und Löschen*, S. 10 ff.), (vgl. Gisbert Rodewald, *Brandlehre*, S. 121 ff.), (vgl. Otto Widetschek, *Was ist Feuer?*, S. 13 ff.).

Radikalreaktionen, welche u. a. in der Flamme einer Verbrennung ablaufen, sind Redoxreaktionen, die nach einem speziellen Mechanismus ablaufen, bei dem, sogenannte Radikale beteiligt sind. Radikale sind Atome oder Moleküle mit ungepaarten Elektronen, die, aufgrund ihres Paarungswillens, sehr reaktionsfreudig sind und demnach mit anderen Radikalen Elektronenpaarbindungen eingehen.

Solche Reaktionen laufen in drei Schritten ab. In der Startreaktion (Aktivierungsreaktion) werden Startradikale durch die Spaltung von Bindungen in einem Molekül, durch Energiezufuhr in Form von Wärme, gebildet. In der Phase der Kettenfortpflanzungs- und Verzweigungsreaktion reagieren diese Radikale mit anderen Molekülen und bilden neue Radikale. Wird immer nur ein neues Radikal gebildet nennt man die Reaktion unverzweigt, werden gleich mehrere neue gebildet, spricht man von einer verzweigten Kettenreaktion, bei welcher enorme Geschwindigkeitssteigerungen möglich sind. Zuletzt findet die Kettenabbruchsreaktion statt, wenn zwei Radikale aufeinandertreffen und ein neues Molekül bilden. Dies geschieht aber in der Praxis nicht, da die Radikale nicht auf Festkörper treffen (vgl. Gisbert Rodewald, *Brandlehre*, S. 121 ff.).

Die *Produkte* eines solchen Verbrennungsvorgangs werden Verbrennungsprodukte (Oxide) genannt und bestehen aus einem Gemisch aus Gasen, Aerosolen und Feststoffen, welche sich bei vollständigen Verbrennungen, hauptsächlich aus Kohlenstoffdioxid und Wasserstoff zusammensetzen.

Ideal vollständige Reaktionen sind nur im Labor durchführbar und somit bei einem Schadfeuer nicht anzutreffen. Im Freien, jedoch, laufen Verbrennungen beinahe vollständig ab, wohingegen in Innenräumen eine stark unvollständige Verbrennung stattfindet. Hierbei fallen große Mengen an Oxidationszwischenprodukten, Asche (nichtbrennbare anorganische Mineraloxide), Schlacken (geschmolzene erstarrte nichtbrennbare Rückstände), Ruß (daran gebunden kondensierte Aromaten und flüchtige Kondensate wie z. B. Benzol, Phenole) und Rauchgasen, bestehend aus Stickstoff, Kohlenmonoxid, aromatischen Verbindungen, Teer, Bitumen, Halogenaromaten, polycyclischen aromatischen Kohlenwasserstoffen, polyhalogenierten Dibenzo-p-dioxinen, Dibenzofuranen, aliphatischen Aldehyden, Schwefeloxid, Ammoniak, Blausäure, usw. an. Diese sind allesamt starke Atemgifte und können auch korrosiv auf unbeschädigte Gebäudeteile wirken. Durch überwiegende Kunststoffe als Brennstoff können jedoch noch viel tödlichere Giftcocktails entstehen (vgl. Kurt Klingsohr, *Verbrennen und Löschen*, S. 29, 49), (vgl. Gisbert Rodewald, *Brandlehre*, S. 136, 190ff.), (Otto Widetschek, *Was ist Feuer?*, S. 14f.).

Allgemein beschrieben wird bei einem Verbrennungsvorgang der brennbare Stoff in einfachere, kleinere Moleküle umgewandelt, wobei in den Endprodukten weniger Energie in den Bindungen steckt. Deswegen ist die Verbrennung eine exotherme Reaktion, bei der Energie in Form von Wärme frei wird. Um diesen Vorgang in Gang zu setzen ist eine gewisse Aktivierungsenergie (Zündquelle) notwendig, welche einige Brennstoffmoleküle zum Pyrolysieren, d. h. zum Verdampfen oder Zerknacken anregt. Diese Bruchstücke reagieren dann mit dem Sauerstoff (der Luft) oder werden zu freien Radikalen, welche weitere Kohlenstoffketten des Brennstoffs angreifen und eine Kettenreaktion in Gang setzen. Ab dem Erreichen des Zündpunkts schreitet die Reaktion von alleine voran, bis der gesamte Brennstoff aufgebraucht ist oder die Reaktion auf eine andere Weise abgebrochen wird (vgl. Otto Widetschek, *Was ist das Feuerdreieck?*, S. 21f.).

2.2 Voraussetzungen für eine Verbrennung, Verbrennungsvorgang im Detail und verbrennungsrelevante Kenngrößen

Die materiellen Voraussetzungen für eine Verbrennung sind der brennbare Stoff in genügender Menge und geeigneter Form, Sauerstoff in ausreichender Menge und das richtige Mengenverhältnis (stöchiometrisches Massenverhältnis) zwischen den beiden. Energetisch gesehen sind die meisten Verbrennungsreaktionen gehemmt. Deshalb bedarf es eines energetischen Anstoßes, der Zündenergie, oder eines Katalysators (vgl. Gisbert Rodewald, Brandlehre, S. 127 f.).

Anschaulich erklärt wird dieser Zusammenhang auch durch das sogenannte Feuerdreieck, welches in den 60er-Jahren entstanden ist, heute jedoch durch den Feuertetraeder Ersatz gefunden hat (vgl. *Otto Widetschek, Was ist das Feuerdreieck?*, S. 22), (vgl. *Otto Widetschek, Aktivierungsenergie und Katalysatoren*, S. 20 f.).

2.2.1 Materielle Voraussetzungen

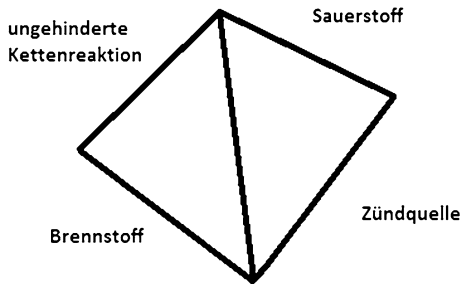
2.2.1.1 Brennbarer Stoff

Eine der materiellen Voraussetzungen für eine Verbrennung stellt der brennbare Stoff (Brennstoff) – also der Stoff welcher sich beim Erreichen der Zündtemperatur unter Feuererscheinung und Wärme mit Sauerstoff verbindet – dar. Dieser kann entweder nach seiner chemischen Zusam-

Abb. 2.1 Feuerdreieck.
(Verfasser)



Abb. 2.2 Feuertetraeder.
(Verfasser)



mensetzung, oder nach seinen Brandeigenschaften, welche in den Brandklassen Ausdruck finden, kategorisiert werden. Welche Kategorisierung herangezogen wird, ist meist stoffabhängig. Bei einem gewöhnlichen Schadfeuer wird jedoch das System der Brandklassen bevorzugt zur Anwendung kommen. Im Folgenden werden beide Kategorisierungen näher erläutert (vgl. Kurt Klingsohr, *Verbrennen und Löschen*, S. 14 ff.), (vgl. Gisbert Rodewald, *Brandlehre*, S. 128 ff.).

Chemisch werden brennbare Stoffe primär in anorganische und organische eingeteilt, wobei allerdings die wenigsten *anorganischen* Stoffe brennbar sind. Ausnahmen stellen lediglich einige Nichtmetalle, wie Wasserstoff, Schwefel und Phosphor, einige Verbindungen, wie Kohlenmonoxid, Schwefelkohlenwasserstoff, Phosphorwasserstoff und Cyanwasserstoff und einige Metalle, wie Eisen, Nickel und Chrom (einige reagieren mit Wasser sogar im nichtbrennbaren Zustand) dar (vgl. Gisbert Rodewald, *Brandlehre*, S. 128 ff.).

Bei der Gruppe der *organischen* Stoffe sind alle Stoffe brennbar, da sie brennbaren Kohlenstoff enthalten. Eingeteilt werden diese in Gruppen mit ähnlichen chemischen und physikalischen Eigenschaften (auch im Brandverhalten) (vgl. Gisbert Rodewald, *Brandlehre*, S. 128 ff.).

Die wichtigsten organischen Stoffe sind die *Kohlenwasserstoffe* mit Ketten- und Ringkohlenwasserstoffen ((Cyclo-)alkane/-ene/-ine), welche alle brennbar sind, meist unvollständig verbrennen, somit stark rußen, und viel Kohlenmonoxid erzeugen. Diese Stoffe zerbrechen (cracken) beim Erhitzen, dies wird auch thermische Aufbereitung genannt.

Aromatische Kohlenwasserstoffe (z. B. Benzol) weisen ein besonderes chemisches Verhalten auf, da sie sich zu kondensierten Aromaten

zusammenlagern können, d. h. ihr Wasserstoff wird vom Ring abgespalten. Der Ring bleibt jedoch bestehen, da er äußerst stabil ist, dies erklärt die besonders starke Rußentwicklung und karzinogene Wirkung der Aromaten (vgl. *Gisbert Rodewald, Brandlehre, S. 128 ff.*).

Die häufigsten in der Natur vorkommenden Kohlenwasserstoffe sind *substituierte funktionelle Kohlenwasserstoffgruppen*, in die andere Moleküle oder Atome eingelagert sind. Nachfolgend sind die, für die Verbrennung relevantesten Gruppen, aufgelistet.

- Funktionelle Gruppen des Sauerstoffs:
 - Alkohole
 - Ether
 - Aldehyde
 - Ketone
 - Karbonsäuren
- Funktionelle Gruppen des Stickstoffs mit Wasserstoff (Aminogruppe)
- Funktionelle Gruppen des Stickstoffs mit Sauerstoff (Nitrogruppe)
- Funktionelle Gruppen der Halogene
- Funktionelle Gruppen des Phosphors
- Funktionelle Gruppen der Metalle

Die *funktionellen Gruppen des Sauerstoffs* sind alle gut brennbar, weisen eine niedrige Zündtemperatur auf und verbrennen relativ vollständig unter Bildung von Atemgiften.

Die *Aminogruppe* wirkt stark brandhemmend, ist jedoch, bei thermischer Zersetzung, auch korrosiv und toxisch (z. B. Ammoniak).

Die *Nitrogruppe* weist eine gesteigerte Brennbarkeit auf und zersetzt sich auch ohne Luftsauerstoff detonationsartig.

Bei den *funktionellen Gruppen der Halogene* ist der Wasserstoff, mehr oder weniger vollständig, durch Halogene (z. B. Fluor oder Chlor) ersetzt. Diese wirken brandhemmend, da Halogenradikale gebildet werden, welche zum Kettenabbruch führen. Ihre Pyrolyseprodukte sind jedoch meist stark korrosiv und toxisch.

Die *funktionellen Gruppen des Phosphors* wirken ebenfalls brandhemmend und finden als Flammschutzmittel Verwendung.

Die *funktionellen Gruppen der Metalle* erhöhen die Brennbarkeit erheblich und lösen meist eine explosive Reaktion mit Wasser aus. Oftmals

sind diese auch selbstentzündlich an der Luft (vgl. *Gisbert Rodewald, Brandlehre, S. 128ff.*).

Die für einen Naturbrand relevantesten Stoffe sind jedoch *organische Stoffe komplexer Struktur*, wie z. B. Holz, Papier, Kohle, Eiweiße, Faserstoffe und Kunststoffe deren Verbrennungsvorgänge kompliziert und teilweise ungeklärt sind. Bei diesen Stoffen ist die Betrachtung anhand von Brandklassen wesentlich sinnvoller (vgl. *Gisbert Rodewald, Brandlehre, S. 148*).

Die Einteilung der Brände brennbarer Stoffe in **Brandklassen** ist praxisbezogen und ermöglicht das Zuordnen von Löschmitteln und -Geräten zu Gruppen brennbarer Stoffe mit gleichem Brandverhalten (vgl. *Gisbert Rodewald, Brandlehre, S. 148*).

Zur **Brandklasse A** zählt man Brände fester Stoffe, die auch unter Glutbildung verbrennen z. B. Brände von Holz, Papier, Kohle, Textilien und Kunststoffen. Feste Stoffe können brennen, wenn sie durch thermische Aufbereitung (Pyrolyse/thermische Zersetzung) schmelzen, verdampfen oder zersetzt werden und brennbare Gase bilden. Diese Gase verbrennen dann als Flammen und der feste Kohlenstoff verbrennt unter Glutbildung. Im Folgenden werden Brände komplexer organischer brennbarer Stoffe näher betrachtet, welche in der Praxis große Bedeutung haben (vgl. *Kemper, Brennen und Löschen, S. 13f.*), (vgl. *Kurt Klingsohr, Verbrennen und Löschen, S. 14ff.*), (vgl. *Gisbert Rodewald, Brandlehre, S. 149ff.*).

Holz: Als Holz bezeichnet man ein inhomogenes Dauergewebe von Holzgewächsen vornehmlich bestehend aus Cellulose, Lignin, Mineralstoffen, Eiweißen, Harzen, Ölen, Kohlenhydraten mit unterschiedlicher Zusammensetzung je nach Holzart und Wasser (luftgetrocknetes Holz: 10–20 % Wasser). Beim Brennvorgang findet zuerst eine thermische Zersetzung des Holzes einhergehend mit einer Wasserfreisetzung statt. Danach entstehen Holzgas (bestehend aus: Wasserstoff, Methan, Kohlenmonoxid, Kohlendioxid), Methylalkohol, Aceton, Essigsäure, Holzteer, usw., welche unter Flammenbildung verbrennen. Die dabei entstehende Wärmeenergie setzt die Holzkohle (den übrig gebliebenen Kohlenstoff) in Brand, die unter Glutbildung verbrennt (vgl. *Gisbert Rodewald, Brandlehre, S. 149f.*).

Holzwerkstoffe und Papier verbrennen meist ähnlich wie Holz, deren Brennbarkeit kann jedoch abhängig von Beimengungen, Zumischungen und Füllstoffen variieren. Papier verbrennt aufgrund seiner großen

Oberfläche aber meist besser als normales Holz (vgl. *Gisbert Rodewald, Brandlehre, S. 151*).

Ernteerzeugnisse (Heu, Stroh, Zuckerschnitzel, ...) sind, abhängig von ihrem Feuchtigkeitsgehalt, gut brennbar. Bei unsachgemäßer Lagerung kann es jedoch durch Bakterienstoffwechsel auch zur Selbstentzündung kommen (vgl. *Gisbert Rodewald, Brandlehre, S. 152*).

Kunststoffe sind entweder Makromoleküle umgewandelter Naturstoffe oder synthetisierte Erdöl-, Erdgas- und Kohleprodukte. Eingeteilt werden Kunststoffe in Thermoplaste, welche bei Erwärmung formbar werden und somit meist zur Brandklasse B gerechnet werden, in Duroplaste, die hart und temperaturbeständig sind und Kunststoffe, die gummielastisch und quellbar sind, sogenannte Elastomere. Thermoplaste brennen sehr gut und haben einen hohen Heizwert, stellen also eine sehr große Brandlast dar (z. B. Polyethylen (PE) 46 MJ/kg, Polystyrol (PS) 46 MJ/kg, Polypropylen (PP) 44 MJ/kg). Im Folgenden werden nun wichtige Beispiele für die Brennbarkeit verschiedener Kunststoffe aufgelistet.

- *Polyolefine* wie Polyethylen und Polypropylen brennen mit heller Flamme, starker Rauchentwicklung und Rußbildung.
- *Polystyrol (Styropor)* verbrennt ebenfalls unter starker Rauchentwicklung mit leicht süßlichem Geruch und heller gelber Flamme.
- *Polyvinylchlorid (PVC)* brennt ohne Zündquelle mit grüner Flamme schlecht weiter, verkohlt und produziert u. a. Salzsäure.
- *Polytetrafluorethylen (Teflon)* beginnt erst bei sehr hoher Temperatur rot zu glühen und produziert Flußsäure.
- *Polyamide (Nylon)* und *Polyacrylnitril* schäumen auf und verkohlen unter bräunlich gelber Flamme.
- *Polycarbonat* treibt blasig auf, verbrennt mit sprühend dunkelgelber Flamme und unter starker Rußbildung.
- *Silikone* sind sehr temperaturbeständig und schlecht brennbar.
- *Melamin-Harze* sind praktisch unbrennbar.
- *Kautschuk* verbrennt unter starker Rauchentwicklung.

Brände von Kunststoffen stellen auch durch ihre Folgeschäden eine große Gefahr dar, da ihre Rauchgase Langzeitgifte wie polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe und korrosive Stoffe wie Salzsäure ent-

Abb. 2.3 Brandklasse A.
(Kolumbus, Brandklasse A, <http://tinyurl.com/Brandklasse-A>)



Abb. 2.4 Brandklasse B.
(Kolumbus, Brandklasse B, <http://tinyurl.com/Brandklasse-B>)



halten (vgl. Gisbert Rodewald, *Brandlehre*, S. 152 ff.), (vgl. Otto Widetschek, *Wie Kunststoffe brennen*, S. 21 ff.).

In die **Brandklasse B** fallen alle Brände flüssiger und flüssig werdender Stoffe z. B. Benzin, Mineralöle und Alkohol, wobei Alkohol eine der wenigen Flüssigkeiten ist, welche aufgrund ihrer Polarität mit Wasser mischbar ist. Flüssigkeiten verbrennen nicht selbst, sondern erst das Dampf-Luft Gemisch, welches beim Verdampfen – Flüssigkeitsteilchen gehen in den gasförmigen Zustand über – entsteht und sich über der Flüssigkeitsoberfläche ansammelt und somit unter Flammenbildung verbrennt (vgl. Kemper, *Brennen und Löschen*, S. 13), (vgl. Gisbert Rodewald, *Brandlehre*, S. 157), (vgl. Otto Widetschek, *Was versteht man unter Brandklassen?*, S. 21 ff.).

Die **Brandklasse C** stellen Brände von Gasen wie Wasserstoff und Erdgas dar, wobei brennbare Gas-Luft Gemische unter Flammenbildung

Abb. 2.5 Brandklasse C.
(Kólumbus, *Brandklasse C*, <http://tinyurl.com/Brandklasse-C>)



Abb. 2.6 Brandklasse D.
(Kólumbus, *Brandklasse D*, <http://tinyurl.com/Brandklasse-D>)



verbrennen (vgl. Kemper, Brennen und Löschen, S. 14), (vgl. Gisbert Rodewald, *Brandlehre*, S. 158).

Brände von Metallen zählen zur **Brandklasse D**. Solche Brände dürfen meist nicht mit Wasser gelöscht werden, da einige Metalle, wie Natrium, Kalium und Calcium, bereits im unbrennbaren Zustand mit Wasser reagieren und es bei vielen Metallen beim Löschen mit Wasser, durch die hohe Temperatur, zur Knallgasbildung kommen kann (vgl. Gisbert Rodewald, *Brandlehre*, S. 158 ff.), (vgl. Otto Widetschek, *Was versteht man unter Brandklassen?*, S. 21 ff.).

Unter der **Brandklasse F** versteht man u. a. Brände von Speiseölen und -Fetten in Kücheneinrichtungen und -Geräten, da bei solchen hochsiedenden flüssigen Stoffen die Gefahr einer sogenannten Fettexplosion beim Löschen mit Wasser besteht (vgl. Gisbert Rodewald, *Brandlehre*, S. 161).

Abb. 2.7 Brandklasse F.
(Kölumbus, Brandklasse F, <http://tinyurl.com/Brandklasse-F>)



Früher existierte auch noch die sogenannte **Brandklasse E** für Brände elektrischer Anlagen, da diese jedoch keinen Stoff bezeichnet wird sie heute nicht mehr verwendet (vgl. Otto Widetschek, *Was versteht man unter Brandklassen?*, S. 21 ff.).

Wichtige **Kenngrößen** in Bezug auf einen Brennstoff stellen Brennwert und Heizwert dar. Der *Brennwert* ist der Quotient zwischen der freiwerdenden Wärmemenge und dem Gewicht des Brennstoffs mitsamt dem enthaltenen Wasser, der *Heizwert* hingegen wird ohne die Verdampfungswärme des Wassers berechnet. Beide geben die freigesetzte Wärmemenge bei vollständiger Verbrennung des Stoffes an. Weitere Kenngrößen sind die *Verbrennungstemperatur*, welche von Verbrennungsgeschwindigkeit (Abbrandrate) und Heizwert abhängig ist, die Entzündbarkeit und die Brennbarkeit (vgl. Kurt Klingsohr, *Verbrennen und Löschen*, S. 20 f.), (vgl. Gisbert Rodewald, *Brandlehre*, S. 110 ff.).

Die *Entzündbarkeit* gibt die Geschwindigkeit der Einleitung des Brennvorgangs an. Ein Stoff ist umso leichter entzündbar je weniger Wärme er zum Erreichen der Zündtemperatur benötigt. Neben der Art des brennbaren Stoffes ist die Entzündbarkeit jedoch auch abhängig von der Größe der Oberfläche und dem Aggregatzustand in dem sich dieser befindet. Bei Gasen und Dämpfen können sich die Brennstoffteilchen direkt mit dem Sauerstoff verbinden, bei festen Stoffen ergibt eine feine Verteilung derer eine große Oberfläche, also eine große Angriffsfläche für den Sauerstoff, wie z. B. bei Stäuben. Die Einteilung erfolgt hierbei in selbstentzündlich (z. B. weißer Phosphor, ölgetränkte Putzlappen), leichtentzündlich (z. B. Acetylen) wobei ein Funke oder

eine heiße Oberfläche zur Zündung genügt, normalentzündlich (meiste brennbare Stoffe) wobei eine Streichholzflamme notwendig ist und schwerentzündlich (z. B. Hartholz) wobei es einer starken Zündquelle, wie einer Gasflamme oder einer Lötlampe bedarf (vgl. *Kemper, Brennen und Löschen*, S. 16), (vgl. *Kurt Klingsohr, Verbrennen und Löschen*, S. 17f.).

Die *Brennbarkeit* gibt das Brandverhalten eines Stoffes nach der Zündung, gemessen an der Brenngeschwindigkeit und der Wärmeentwicklungsrate, an. Schwerbrennbare Stoffe, z. B. Wolle, erlöschen nach der Wegnahme der Zündquelle, d. h. andauernde Wärmezufuhr ist, für das aufrechterhalten der Verbrennung, notwendig (Baustoffklasse: schwerentflammbar B1). Normalbrennbare Stoffe, z. B. Holz, brennen mit normaler Geschwindigkeit weiter (Baustoffklasse: normalentflammbar B2) und leichtbrennbare Stoffe, z. B. Gase, Stäube, Dämpfe, brennen mit hoher Geschwindigkeit weiter (Baustoffklasse: leichtentflammbar B3) (vgl. *Kemper, Brennen und Löschen*, S. 16), (vgl. *Kurt Klingsohr, Verbrennen und Löschen*, S. 18ff.).

2.2.1.2 Sauerstoff

Die zweite wichtige materielle Voraussetzung für eine Verbrennung stellt der Sauerstoff dar. Er besitzt die zweitgrößte Elektronegativität (3,5), ist farb-, geruch- und geschmacklos und selbst unbrennbar. Er dient bei der Verbrennung als Oxidationsmittel, d. h. Sauerstoffradikale reagieren mit dem brennbaren Stoff. Für eine Verbrennung genügt der Luftsauerstoff von 20,94 Vol.%, jedoch kann eine Sauerstofferhöhung Entzündbarkeit, Verbrennungsgeschwindigkeit und Brandtemperatur erhöhen, d. h. unter reinem Sauerstoff verläuft eine Verbrennung am vollständigsten. Stoffe wie Peroxide, Nitrate und Sprengstoffe benötigen keinen Luftsauerstoff für die Verbrennung, da sie den Sauerstoff bereits in sich tragen, die meisten anderen Stoffe jedoch hören bei weniger als 15 Vol.% Sauerstoffgehalt auf zu brennen (vgl. *Kemper, Brennen und Löschen*, S. 18f.), (vgl. *Gisbert Rodewald, Brandlehre*, S. 161 ff.).

2.2.1.3 Richtiges Mengenverhältnis

Das richtige Mengenverhältnis (stöchiometrisches Massenverhältnis) zwischen Brennstoff und Sauerstoff ist die letzte materielle Voraussetzung für den Verbrennungsvorgang. Durch die Konzentration derer

Tab. 2.2 Gefahrenklassen brennbarer Flüssigkeiten. (Vgl. *Kemper, Brennen und Löschen*, S. 22)

Gefahrenklasse	Symbol	Flammpunkt	Siedepunkt
Hochentzündlich	F+	Kleiner 0 °C	Bis 35 °C
Leichtentzündlich	F	Kleiner 21 °C (Zimmertemperatur)	–
Entzündlich	R10	21 °C–55 °C (Sonneinstrahlung)	–

ergeben sich die Explosionsgrenzen und der daraus resultierende Explosionsbereich. Die untere Explosionsgrenze (UEG) gibt die niedrigste (unterhalb „mageres Gemisch“) und die obere Explosionsgrenze (OEG) (oberhalb „fettes Gemisch“) die höchste Konzentration bei der eine Zündung möglich ist, an. Bei Flüssigkeiten nennt man die untere Explosionsgrenze Flammpunkt (z. B. Benzin –40 °C, Alkohol 12 °C), da Flüssigkeiten bereits unter ihrem Siedepunkt durch verdunsten ein, für eine Verbrennung ausreichendes, Dampf-Luft Gemisch erzeugen können, welches, wenn die UEG bzw. der Flammpunkt überschritten ist, entzündet werden kann. Bei Flüssigkeiten gibt man auch den Brennpunkt an, welcher jener Punkt ist, ab dem sie selbständig weiterbrennen (vgl. *Kemper, Brennen und Löschen*, S. 20 ff.), (vgl. *Gisbert Rodewald, Brandlehre*, S. 167 ff.).

Flüssigkeiten werden nach ihrem Flammpunkt in Gefahrenklassen (hochentzündlich F+, leichtentzündlich F, entzündlich R10) eingeteilt (vgl. *Kemper, Brennen und Löschen*, S. 22 f.).

In der Verordnung brennbarer Flüssigkeiten geht man noch weiter und klassifiziert Flüssigkeiten nicht nur nach ihrem Flammpunkt sondern auch nach ihrer Löslichkeit in Wasser.

Je besser die Verteilung eines Stoffes, d. h. je größer seine Oberfläche ist, desto besser und schneller läuft die Verbrennung ab, da das Verhältnis zum Sauerstoff sich ebenfalls verbessert (vgl. *Kurt Klingsohr, Verbrennen und Löschen*, S. 35 f.).

Je nachdem wie nahe das Mischungsverhältnis von Brennstoff und Sauerstoff am stöchiometrischen Verhältnis liegt, ergeben sich verschiedenen starke Reaktionen. So kommt es bei Gas/Dampf-Luft Gemischen nahe der Zündgrenzen zu einer Verpuffung, also einer schnellen Verbren-

nung bei geringem Druck. Bei Gasen, Dämpfen, Nebeln und Stäuben im richtigen Mischungsverhältnis kommt es zu einer Explosion, d. h. einer sehr schnell ablaufenden Verbrennung unter starker Wärme-, Druck-, Licht- und Geräuscentwicklung. Findet solch eine Reaktion im richtigen Mengenverhältnis mit reinem Sauerstoff oder mit Sprengstoff statt, ergibt sich eine starke Explosion, also eine Detonation bei der die Zündung der benachbarten Teilchen nicht mehr durch Wärmeübertragung, sondern durch die entstehende Kompressionswärme entsteht und somit die Durchzündung mit Überschallgeschwindigkeit erfolgt (z. B. Knallgas) (vgl. Kurt Klingsohr, *Verbrennen und Löschen*, S. 35f.).

Hier ergibt sich wieder eine verbrennungsrelevante Größe, die Verbrennungsgeschwindigkeit, welche von der Änderung der Konzentration der beteiligten Stoffe im Verhältnis zur Zeit abhängt (vgl. Gisbert Rodewald, *Brandlehre*, S. 115ff.).

2.2.2 Energetische Voraussetzungen

Zusätzlich zu den materiellen Voraussetzungen müssen für eine Verbrennung auch gewisse energetische Voraussetzungen gegeben sein, da die meisten Reaktionen zuerst gehemmt sind und somit einen energetischen Anstoß, d. h. also eine Aktivierungsenergie zum Start benötigen. Diese Aktivierungsenergie nennt man *Zündenergie* und diese wird meist von einer Zündquelle geliefert. Erreicht ein Stoff seine Zündtemperatur beginnt er zu brennen (z. B. Benzin 450 °C, Zeitungspapier 180 °C). Durch eine langfristig erhöhte Temperatureinwirkung kann bei Stoffen wie Holz eine Zündpunkterniedrigung durch Austrocknen eintreten (Saunabrand) (vgl. Kemper, *Brennen und Löschen*, S. 24f.), (vgl. Gisbert Rodewald, *Brandlehre*, S. 176ff.).

Die *Mindestverbrennungstemperatur* gibt an, unter welcher Temperatur sich ein Feuer selbstständig nicht mehr fortpflanzen kann und somit erlischt, da benachbarte Teilchen die Zündtemperatur nicht mehr erreichen (vgl. Kemper, *Brennen und Löschen*, S. 25), (vgl. Kurt Klingsohr, *Verbrennen und Löschen*, S. 24).

Neben solchen Stoffen, die eine Zündquelle, also Fremdentzündung, zum Erreichen ihrer Mindestzündenergie brauchen, gibt es auch solche, die sich durch ihre eigene Reaktionswärme und Wärmestau *selbst ent-*

Tab. 2.3 Temperaturen häufiger Zündquellen. (Vgl. *Otto Widetschek, Alles über Zündquellen*, S. 21)

Temperatur	Zündquelle
100 °C	Beginn der Brandgefahr
Bis 500 °C	Heiße Körper
Bis 1000 °C	Glut, Funken
Bis 1500 °C	Flammen
Bis 3000 °C	Stichflammen, elektrischer Lichtbogen

zünden, da sich laut Van't Hoff'scher Regel neben der Temperatur auch die Reaktionsgeschwindigkeit erhöht, was ein Aufschaukeln bis zum Erreichen der Zündtemperatur mit sich bringt (z. B. Phosphor, Heu (Bakterienstoffwechsel), ölgetränkte Textilien und Braunkohle) (vgl. *Kemper, Brennen und Löschen*, S. 24), (vgl. *Kurt Klingsohr, Verbrennen und Löschen*, S. 44 ff.), (vgl. *Gisbert Rodewald, Brandlehre*, S. 183 f.).

Zur *Fremdentzündung* wird eine Zündquelle benötigt, also eine Energie von außen, die die Oxidation auslöst. Die Zündung erfolgt dabei durch Wärmeübertragung in Form von Wärmeleitung (z. B. Schweißen, Löten), Konvektion (Brandgase) und Wärmestrahlung (vgl. *Gisbert Rodewald, Brandlehre*, S. 90 ff.), (vgl. *Otto Widetschek, Alles über Zündquellen*, S. 21 ff.).

Tab. 2.4 Österreichischer Zündquellenschlüssel. (Vgl. *Otto Widetschek, Alles über Zündquellen*, S. 22)

Österreichischer Schlüssel	Zündquelle
100	Blitzschlag
200	Selbstentzündung
300	Wärmeegeräte
400	Mechanische Energie
500	Elektrische Energie
600	Offenes Feuer, Licht
700	Behälter-Explosionen
800	Brandlegung
900	Sonstige Zündquellen (z. B. Kernenergie, Sonne)
010	Nicht ermittelbar

Die in der Praxis am häufigsten vorkommenden Zündquellen sind Schweiß- und Lötgeräte, Rauch, offenes Feuer, Brandstiftung und vor allem Elektrizität.

Eine der häufigsten Brandursachen stellt die Elektrizität in allen ihren Variationen dar. Brandgefahr besteht hierbei durch Elektrizitätsversorgung und Betriebsmittel (Lichtbogen, Funken, Wärme, ...) sowohl im Normalbetrieb, als auch bei Defekt und die statische Elektrizität beim Gehen auf Unterlagen, Umfüllen von Flüssigkeiten, Sprühen aus Spraydosen und Pulver auf Transportrutschen. Dazu kommt noch der Blitzschlag, welcher direkt oder indirekt als Zündquelle wirken kann (vgl. *Otto Widetschek, Alles über Zündquellen, S. 21 ff.*), (vgl. *Otto Widetschek, Elektrizität, S. 21 ff.*).

Der zweite wichtige energetische Faktor um eine Verbrennung zu ermöglichen ist die *ungehinderte Kettenreaktion*, welche meist nicht von alleine vorliegt. Oft genügt eine Zündquelle nicht um die Aktivierungsenergie zu erreichen und die Verbrennungsreaktion zu starten (gehemmte Reaktion), ein Katalysator ist notwendig. Katalysatoren sind Stoffe die mit den Ausgangsstoffen Radikale bilden und somit die Reaktion ermöglichen und/oder beschleunigen, sich selbst aber im Laufe der Reaktion wieder zurückbilden und somit nicht verbraucht werden. Kurz gesagt setzen Katalysatoren die Aktivierungsenergie, also den Zündpunkt herab. In der Praxis laufen Verbrennungsreaktionen meist mit Katalysatoren ab, da in der Luft genügend Wasserstoff- und Hydroxylradikale vorliegen. Das Gegenteil des Katalysators ist der Antikatalysator oder Inhibitor, der die Reaktion stoppt oder zumindest verlangsamt (vgl. *Kemper, Brennen und Löschen, S. 25*), (vgl. *Gisbert Rodewald, Brandlehre, S. 187 ff.*).

2.3 Besonderheiten beim Brandverlauf in geschlossenen Räumen

Bei Bränden in geschlossenen Räumen kann es zu den zwei wichtigen Phänomenen Rauchdurchzündung und Rauchexplosion kommen.

Werden noch nicht brennbare Stoffe durch die Hitze eines Entstehungsbrands im Raum thermisch aufbereitet, strömen sie brennbare Pyrolysegase aus, welche beim Erreichen der Zündtemperatur und der richtigen Sauerstoffkonzentration schlagartig durchzündend, dieser Vorgang

wird *Rauchdurchzündung* oder auch „*Flash-over*“ genannt. Begünstigt wird diese Rauchdurchzündung durch einen plötzlichen Zustrom von Sauerstoff (vgl. *Kemper, Brennen und Löschen*, S. 26 ff.), (vgl. *Gisbert Rodewald, Brandlehre*, S. 117 ff., 185).

Erlöschen die Flammen jedoch, da in einem Raum zu wenig Sauerstoff vorhanden ist, kann es zu einem Schwelbrand kommen, bei dem große Mengen Kohlenmonoxid, durch die unvollständige Verbrennung entstehen, wobei die Temperatur aber weiterhin ansteigt. Die dabei entstehenden Pyrolysegase bilden mit dem Kohlenmonoxid ein fettes Gemisch, welches beim Öffnen eines Fensters oder einer Tür durch den schlagartigen Sauerstoffzustrom zu einer *Rauchexplosion*, auch „*Back-draft*“ genannt, führen kann (vgl. *Kemper, Brennen und Löschen*, S. 26 ff.), (vgl. *Gisbert Rodewald, Brandlehre*, S. 117 ff., 185).

Nachdem nun alle verbrennungsrelevanten Begriffe definiert sind, sowie der Verbrennungsvorgang und alle Voraussetzungen für diesen erklärt wurden, kann im nächsten Kapitel auf den Löschvorgang und die Löscheffekte eingegangen werden.

Literatur

- Kemper: Brennen und Löschen. 3. Auflage. Landsberg/ Lech: Hüthig Jehle Rehm GmbH, 2008
- Klingsohr, Kurt: Verbrennen und Löschen. 17. Auflage. Stuttgart: W. Kohlhammer GmbH, 2002
- Rodewald, Gisbert: Brandlehre. 6. Auflage. Stuttgart: W. Kohlhammer GmbH, 2007
- Widetschek, Otto: Alles über Zündquellen. In: Blaulicht. Fachzeitschrift für Brandschutz und Feuerwehrtechnik. 2009, 58, 12, S. 20–24
- Widetschek, Otto: Der große Gefahrgut Helfer. Gefahren, richtiges Verhalten und Einsatzmaßnahmen bei Schadstoff-Unfällen. Graz – Stuttgart: Leopold Stocker Verlag, 2012
- Widetschek, Otto: Elektrizität. In: Blaulicht. Fachzeitschrift für Brandschutz und Feuerwehrtechnik. 2009, 58, 06, S. 20–24
- Widetschek, Otto: Was ist das Feuerdreieck?. In: Blaulicht. Fachzeitschrift für Brandschutz und Feuerwehrtechnik. 2009, 58, 08, S. 20–22
- Widetschek, Otto: Was ist Feuer?. In: Blaulicht. Fachzeitschrift für Brandschutz und Feuerwehrtechnik. 2010, 59, 01, S. 12–15

-
- Widetschek, Otto: Was versteht man unter Brandklassen. In: Blaulicht. Fachzeitschrift für Brandschutz und Feuerwehrtechnik. 2009, 58, 09, S. 20–23
- Widetschek, Otto: Wie Kunststoffe brennen. In: Blaulicht. Fachzeitschrift für Brandschutz und Feuerwehrtechnik. 2010, 59, 05, S. 20–23

Löschmittel in der Brandbekämpfung

Pfeiffer, A.

2016, IX, 72 S. 16 Abb., 14 Abb. in Farbe., Softcover

ISBN: 978-3-658-12970-5