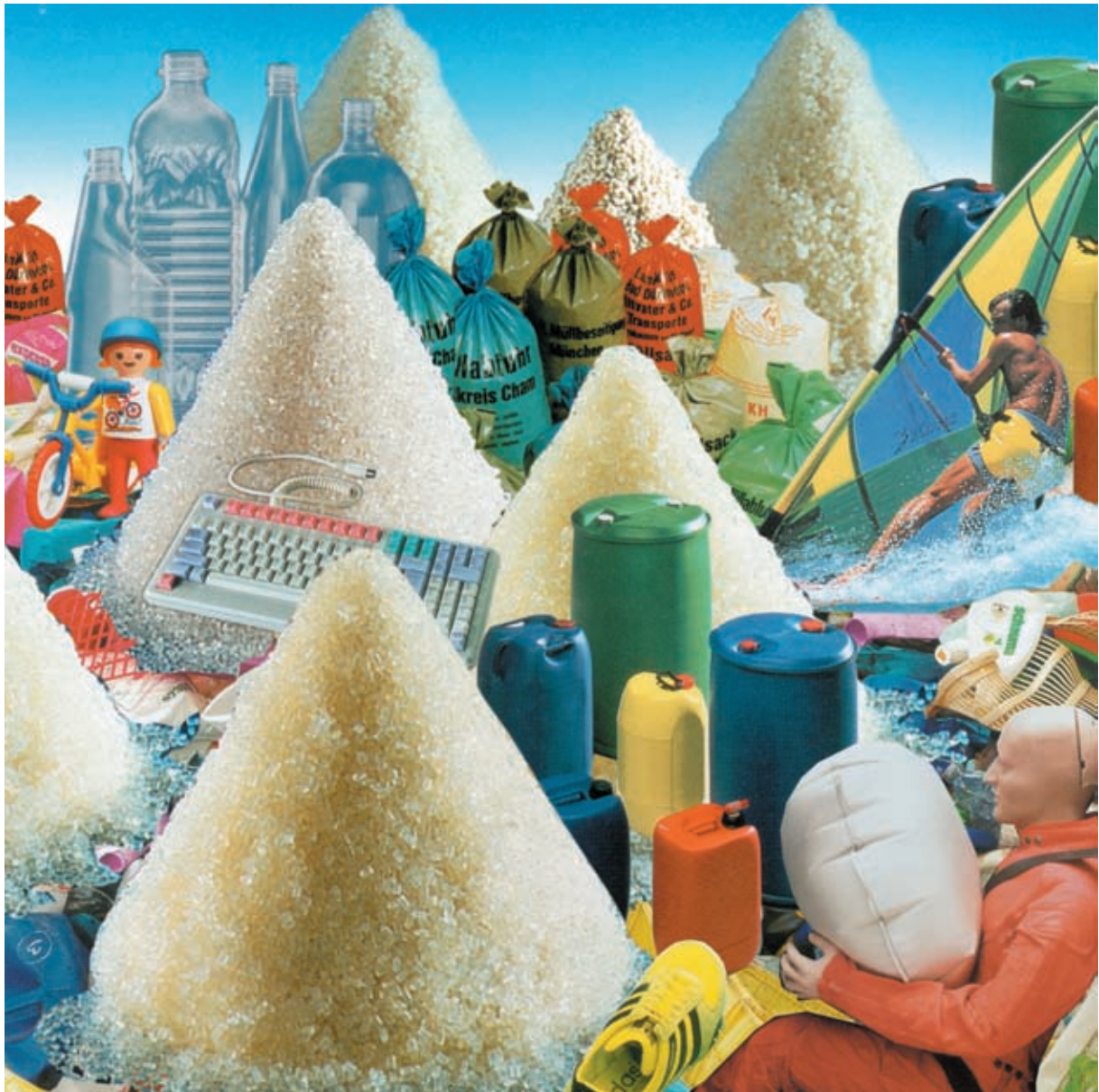


Kunststoffe

Eigenschaften, Brandverhalten, Brandgefahren



Die vorliegende Publikation ist unverbindlich. Die Versicherer können im Einzelfall auch andere Sicherheitsvorkehrungen oder Installateur- oder Wartungsunternehmen zu nach eigenem Ermessen festgelegten Konditionen akzeptieren, die diesen technischen Spezifikationen oder Richtlinien nicht entsprechen.

Kunststoffe

Eigenschaften, Brandverhalten, Brandgefahren

Inhalt

Vorwort	4
1 Einleitung	4
2 Eigenschaften, Struktur und Zusammensetzung	6
2.1 Zusammensetzung und Aufbau	6
2.2 Einteilung	6
2.3 Zuschlagstoffe (Ausrüstung der Kunststoffe)	7
3 Brandverhalten	8
3.1 Brandeigenschaften	8
3.2 Einfluss der Formgebung und der Menge auf den Brandverlauf	10
3.3 Brandverhalten beim Zusammenwirken verschiedener Stoffe	11
4 Lagerung, Verarbeitung und Verwendung	11
4.1 Gefahren bei der Lagerung	11
4.2 Gefahren bei der Verarbeitung	12
4.3 Gefahren bei der Verwendung	16
4.4 Wiederverwendung	16
4.5 Brandschutzmaßnahmen	16
5 Auswirkungen beim Brand von Kunststoffen	17
5.1 Freigesetzte Stoffe bei Kunststoffbränden	17
5.2 Gefährdungseinschätzung und Schadstoffauswirkungen	19
5.3 Umweltschutzmaßnahmen	22
6 Glossar	25
7 Literatur	29

Vorwort

Diesen Technischen Informationen Kunststoffe liegen die Erfahrungen der Feuerversicherer aus der Beurteilung technischer Risiken und der Bearbeitung von Schäden ebenso zu Grunde wie die Erkenntnisse der Kunststoff erzeugenden und Kunststoff verarbeitenden Industrie. In diesem Zusammenhang gilt unser Dank dem Verband der Kunststoff erzeugenden Industrie e.V. (VKE) für die freundliche Unterstützung mit erläuterndem Bild- und Grafikmaterial sowie für die fachliche Durchsicht.

Die Technischen Informationen Kunststoffe beschreiben

- Eigenschaften, Struktur und Zusammensetzung von Kunststoffen,
- das Brandverhalten von Kunststoffen,
- besondere Gefahren bei der Lagerung, Verarbeitung und Verwendung von Kunststoffen sowie
- Auswirkungen beim Brand von Kunststoffen.

Dabei finden die unterschiedlichen Herstellungs- und Verarbeitungsverfahren ebenso Erwähnung wie der Einfluss von Zuschlagstoffen und Formgebung auf das Brandverhalten sowie die Gefährdungseinschätzung von Brandfolgeprodukten.

Die Technischen Informationen Kunststoffe sind bewusst so konzipiert, dass mögliche Gefahrenpotenziale aufgezeigt und Sachverhalte neutral erläutert werden, allerdings keine konkreten Lö-

sungsansätze in Form von Empfehlungen zum Brand- und Umweltschutz vorgenommen werden. Sie liefern damit fundierte Grundlagen für die Ausarbeitung konkreter Brand- und Umweltschutzkonzepte, welche dazu beitragen sollen, Brandgefahren und deren Auswirkungen zu verringern.

Im Glossar werden Fachausdrücke erläutert, die im Text mit einem Zeichen (*) gekennzeichnet sind.

1 Einleitung

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.

Anders als Naturstoffe lassen sich viele Kunststoffe unter Wärme und Druck schmelzen und verformen. Die chemischen und physikalischen Eigenschaften von Kunststoffen können weiterhin durch die Art der Herstellung sowie durch Zuschlagstoffe variiert, ja sogar auf spezielle Anwendungszwecke hin maßgeschneidert werden.

Die ersten Kunststoffe wurden vor rund 100 Jahren aus chemisch veränderten Naturstoffen, z.B. Zellulose (Zelluloid) oder Gasein (Galalith), hergestellt. Vor etwa 50 Jahren begann die stürmische Entwicklung vielfältiger Kunststoffe auf petrochemischer Basis (d.h. aus Erdölprodukten) und deren Massenproduktion. Kunststoffe sind im Wirt-



Abbildung 1: Typische Anwendungen für Kunststoffe

schaftsleben und im Alltag nahezu unverzichtbar geworden.

Es gibt eine Vielzahl von Einordnungsmöglichkeiten von Kunststoffen. Eine davon orientiert sich an den physikalischen, insbesondere thermischen Eigenschaften. Danach werden die folgenden Gruppen unterschieden:

- Thermoplaste
- Duroplaste
- Elastomere

Aus jedem Kunststoff dieser Gruppe ist auch grundsätzlich die Herstellung von Schaumkunststoffen möglich. Wegen ihrer besonderen Eigenschaften können diese auch einer eigenen Gruppe zugeordnet werden.

Eine Auswahl der gebräuchlichsten Kunststoffe und deren typische Anwendungsgebiete sind Tabelle 1 zu entnehmen.

Kunststoff (Kurzzeichen)	Kunststoffnamen	Art ¹⁾	typische Anwendungen
PE (LDPE, HDPE) ²⁾	Polyethylen	T	Folien, Verpackungsmaterial, Platten, Rohre, Formteile, Haushaltsgeräte
PP	Polypropylen	T	wie PE, Transportbehälter, Bierkisten
PS	Polystyrol	T	Haushaltsartikel, Gefäße, Verpackungsmaterial; als Schaumstoff unter dem Markennamen "Styropor" bekannt
PVC (hart und weich)	Polyvinylchlorid	T	Folien, Verpackungen, Rohre, Profile, Kabelmäntel, Fußbodenbeläge, Fensterprofile
PU	Polyurethan	T	harte und weiche- sowie Integralschäume, Profile, Formteile
PA	Polyamid	T	Geräteteile (Zahnräder u.a.), Formteile, Beschichtungen, Kunstfasern
PC	Polycarbonat	T	Formteile, Sicherheits Scheiben, Kompaktdisks
PTFE	Polytetrafluorethylen	T	hochwertige Beschichtungen, Schläuche und Dichtungen, Filtersäcke, Membranen
POM	Polyoximethylen	T	maßhaltige Präzisionsteile, Getriebeteile, kraftstoffführende Pumpen, federnde Schnappverbindungen; glasfaserverstärkte Anwendungen
ABS	Acrylnitril-Butadien-Styrol	T	Gehäuse von Telefonen und Haushaltsgeräten
PETP	Polyethylenterephthalat	T	Kunststoff-Getränkeflaschen
PMMA	Polymethylmethacrylat	T	Verglasungen, Lampenkörper, Sanitäreinrichtungsgegenstände, Haushaltsgeräte
PAN	Polyacrylnitril	T ³⁾	Kunstfaser
PF	Phenol-Formaldehyd	D	Formteile, Geräteteile, elektrotechnische Artikel, Schichtpressstoffe
UP	(ungesättigte) Polyesterharze	D	Geräteteile, Boote, Silos, Wellplatten, Profile, Gießharze
SI	Silicon	D	Schläuche, Gleit- und Schmiermittel
	Buna	E	Rohstoff für die Gummiindustrie
	Chlorkautschuk	T	Korrosionsschutzüberzüge

¹⁾ T = Thermoplast, D = Duroplast, E = Elastomer

²⁾ LD = Low Density (Hochdruck); HD = High Density (Niederdruck)

³⁾ PAN ist als thermoplastische Formmasse nicht zu verarbeiten

Tabelle 1: Kurzzeichen, Namen, Art und typische Anwendungen von Kunststoffen

2 Eigenschaften, Struktur und Zusammensetzung

2.1 Zusammensetzung und Aufbau

Das Grundelement aller organischen Verbindungen, somit also auch der Kunststoffe, ist der Kohlenstoff. Dieses Element bildet im Wesentlichen das Skelett der Moleküle, die neben Wasserstoff eine Reihe weiterer Elemente wie Sauerstoff, Stickstoff, Chlor, Fluor usw. enthalten können.

Die Makromoleküle der Kunststoffe können linear, verzweigt oder vernetzt sein. Lineare Kunststoffmoleküle besitzen keine Seitenketten, verzweigte Kunststoffmoleküle haben Seitenketten, vernetzte Kunststoffmoleküle sind dreidimensional weitmaschig oder engmaschig miteinander verknüpft. Auf Grund dieser Verflechtung und Vernetzung besitzen solche Kunststoffe auch voneinander stark abweichende thermische, mechanische und andere Eigenschaften.

2.2 Einteilung


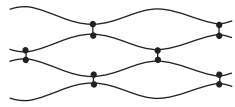

Kunststoffe mit linearem und verzweigtem Aufbau sind in der Regel **Thermoplaste**. Diese sind durch Erwärmen bis zur Fließbarkeit erweichbar und erhärten beim Abkühlen. Werden bestimmte Temperaturen, bei denen die Makromoleküle abgebaut werden, nicht überschritten, können

Thermoplaste beliebig häufig erweicht und wieder neu ausgeformt werden.

Weitmaschig vernetzte Kunststoffe gehören zu den Elastomeren, engmaschig vernetzte Kunststoffe zählen zu den Duroplasten. **Duroplaste** erstarrten nach der Formgebung zu erhärteten Formteilen, die durch Erwärmen nicht mehr plastisch verformt werden können.

Bei den **Elastomeren** handelt es sich um makromolekulare Stoffe mit kautschukelastischem Verhalten. Sie nehmen eine Zwischenstellung zwischen festem Körper und Flüssigkeit ein. Formänderung durch Einwirkung äußerer Kräfte wird im elastischen Bereich nach Beendigung der Krafteinwirkung wieder vollständig rückgängig gemacht. Zu den Elastomeren gehören neben dem Naturkautschuk die verschiedenen Synthesekautschuke und einige spezielle Materialien, wie z.B. Thioplast, Silikonkautschuk, chlorsulfoniertes Polyethylen, Weichpolyurethane und Weichpolyurethanschäume. Beim Erhitzen kommt es zum Schmelzen der Elastomere. Durch Pyrolyse der Makromoleküle werden große Mengen brennbarer Gase freigesetzt.

Die wichtigsten Grundeigenschaften von Thermoplasten, Elastomeren und Duroplasten sind in Tabelle 2 gegenübergestellt.

Eigenschaften	Thermoplaste	Elastomere	Duroplaste
mechanische Eigenschaft/Festigkeit	weich, aber auch halbhart und hart möglich	elastisch, gummiartig	halbhart, hart, spröde
Verhalten beim Erwärmen ¹⁾	Erweichung	leichte Erweichung	keine Erweichung
Verhalten beim Abkühlen ²⁾	Verfestigung und Verhärtung	Abnahme der Elastizität	keine Änderung
chemischer Aufbau	lineare Ketten mit und ohne Seitenkette	weitmaschige intermolekulare Verknüpfung	engmaschige intermolekulare Verknüpfung
Struktur / Vernetzung der Makromoleküle	keine chemische Vernetzung  Bei Erwärmung können sich die Moleküle gegeneinander bewegen. Daraus resultiert die thermische Verformbarkeit.	leichte chemische Vernetzung (Bindungsbrücken)  Durch äußeren Kraftaufwand wird das Molekülnetz elastisch gedehnt.	starke chemische Vernetzung  Die starke Vernetzung führt zu einem starren Gefüge, welches weitgehend unabhängig gegen Temperatur- und äußere Krafteinwirkung ist.

¹⁾ Bei allen Kunststoffen tritt oberhalb der Zersetzungstemperatur in Gegenwart von Luft eine Zersetzung, d.h. Zerfall der Makromoleküle in kleinere Einheiten, ein.

²⁾ Bei sehr niedrigen Temperaturen werden alle Kunststoffe hart und spröde.

Tabelle 2: Wichtige Grundeigenschaften von Thermoplasten, Elastomeren und Duroplasten

2.3 Zuschlagstoffe (Ausrüstung der Kunststoffe)

Eigenschaften und Aussehen von Kunststoffen können durch Zusätze erheblich verändert werden. Es gibt kaum Kunststoffe ohne Zuschlagstoffe (Additive). Diese werden als Gleitmittel, Trennmittel, Antioxidantien, Antiblockmittel oder für andere Zwecke bei der Verarbeitung benötigt oder zur Verbesserung der Eigenschaften zugesetzt. Vielfach handelt es sich hierbei um Flammenschutzmittel, Füllstoffe, Weichmacher, Farbpigmente und Riechstoffe.

Der Einsatz von einigen Thermoplasten in bestimmten Anwendungsbereichen mit erhöhter Brandgefahr wird erst durch die Herabsetzung der Entflammbarkeit* und Abbrandgeschwindigkeit* durch den Zusatz von Flammenschutzmitteln ermöglicht. Die zugemischten Flammenschutzmittel werden als Flammschutzrüstung von Kunststoffen bezeichnet. Kunststoffe ohne solche Stoffe können sich an einem Brandgeschehen exzessiv beteiligen.

Alle Kunststoffe altern. Dieser Vorgang ist zum einen vom Kunststoff, d.h. von der Art des Kunststoffes und dessen Ausrüstung, zum anderen von einer Reihe Umgebungseinflüssen abhängig. Die wichtigsten davon sind:

- Luftsauerstoff
- Temperatur
- Licht (UV-Wellenbereich)
- Feuchte
- mechanische Beanspruchung (Zug, Schwingungen)

Alterungserscheinungen können sich auf mechanische (z.B. Versprödung, Rissbildung), optische (z.B. Farbe) oder chemische (z.B. Zusammensetzung) Eigenschaften negativ auswirken. Deshalb sind in Kunststoffen häufig eine Vielzahl verschiedener Stabilisatoren enthalten (siehe Abschnitt 2.3.4).

2.3.1 Flammenschutzmittel

Flammenschutzmittel sind Zuschlagstoffe, die durch physikalische und/oder chemische Wirkungsweise die Entflammbarkeit* und Abbrandgeschwindigkeit* herabsetzen, die Brennbarkeit der Stoffe selbst aber nicht aufheben. Bei den physikalischen Effekten stehen die Kühlung durch endotherme* Prozesse, die Ausbildung einer Schutzschicht zur Abschirmung gegen Sauerstoff und Wärme sowie die Verdünnung durch phlegmatisierende* Füllstoffe im Vordergrund. Die chemischen Flammenschutzmittel wirken entweder in der

festen Phase oder in der Gasphase. Dort wird durch direkte chemische Einwirkung von Molekülbruchstücken der Flammenschutzmittel (so genannte Radikale) der Verbrennungsvorgang gehemmt.

Eine herausragende Stellung bei den chemisch wirkenden Flammenschutzmitteln nehmen die Halogene* Brom und Chlor, oft in Verbindung mit Schwermetallverbindungen, ein (siehe Abschnitt 5.1).

Wenn mit Flammenschutzmitteln ausgerüstete Kunststoffe altern (siehe Abschnitt 2.3), können sich ihre Eigenschaften derart ändern, dass sie leicht entflammbar und gut brennbar werden.

2.3.2 Weichmacher

Weichmacher sind Substanzen, die einen harten und spröden Kunststoff weich und schmiegsam machen. Neben den weich machenden Eigenschaften sind Verträglichkeit und Geliervermögen die wichtigsten Eigenschaften dieser Stoffe, die überwiegend zu der chemischen Stoffgruppe der Ester zählen. Die kleinen beweglichen Weichmacherdipole der Ester schieben sich zwischen die Kettenmoleküle des Kunststoffs und binden sich an deren Dipole, wodurch die Struktur des Kunststoffs aufgelockert und beweglicher wird. Besondere Bedeutung haben die Ester der Phthalsäure (z.B. Dioctylphthalat), der Trimellitsäure (z.B. Tris-(2-ethylhexyl)-trimellitat), von aliphatischer Dicarbonsäuren (z.B. der Adipinsäure), organischer Phosphate (z.B. Trikresylphosphat), von Fettsäuren und von Hydroxycarbonsäuren.

2.3.3 Füllstoffe

Füllstoffe haben im Allgemeinen die Aufgabe, bei möglichst weitgehender Erhaltung der gewünschten Eigenschaften, den Kunststoff zu strecken. Die am häufigsten eingesetzten pulverförmigen anorganischen Füllstoffe sind z.B. Talkum, Kaolin, Kreide, Schiefermehl, Glimmerpulver und Schwespat. Der Einsatz sehr großer Anteile unbrennbarer Füllstoffe wirkt phlegmatisierend* auf das Brandgeschehen.

Nicht als Füllstoffe im eigentlichen Sinne werden beispielsweise Harzträger angesehen, weil auf ihrem Vorhandensein Struktur und Eigenschaften der Kunststoffformteile beruhen, wie z.B. bei der Glasfaserverstärkung.

2.3.4 Stabilisatoren

Einer Vielzahl von Kunststoffen werden Stabilisatoren (Antioxidantien) zugesetzt, um den oxidativen Abbau durch Wärme oder durch den UV-Anteil des Lichtes zu verhindern. Ihre Zusammensetzung muss auf das verwendete Polymer und auf die jeweilige Gebrauchsanforderung des Kunststoffs ab-

gestimmt sein. Die Wirkung der Stabilisatoren besteht meist darin, dass sie als Radikalfänger für die bei der Autoxidation auftretenden freien Radikale wirken und die Kettenreaktion abbrechen. Als Stabilisatoren kommen sowohl organische als auch anorganische Verbindungen in Frage. Ruß ist ein nahezu universell anwendbarer UV-Stabilisator.

2.3.5 Farbpigmente

Farbpigmente sind anorganische oder organische pulverförmige, im Kunststoff unlösliche Farbmittel. Die gebräuchlichsten Weißpigmente sind Titan- oder Zinkoxide. Schwarzpigmente sind Ruß und Eisenoxid. Als Buntpigmente werden die Oxide/Sulfide von Eisen, Mangan, Chrom, Blei, Zink, Molybdän und Cadmium in geringer Konzentration verwendet.

Neben den unlöslichen Pigmenten spielen auch noch die löslichen organischen Farbstoffe bei der Farbgebung von Kunststoffen, insbesondere den transparenten Kunststoffen, eine wichtige Rolle.

3 Brandverhalten

3.1 Brandeigenschaften

Wesentlicher Bestandteil aller organischen Stoffe, und damit auch der Kunststoffe (mit Ausnahme einiger Silikone), ist das Element Kohlenstoff. Dies ist auch der Grund dafür, dass alle organischen Produkte entweder brennen oder das Brandgeschehen beeinflussen können. Je nach Kunststoffart und dessen Zumischungen kann die Brennbarkeit stark variieren (siehe Tabelle 4).

Das Brandverhalten von Kunststoffen ist nicht nur eine Stoffeigenschaft, sondern hängt, wie bei allen anderen Stoffen, auch von der Form, Oberflächenbeschaffenheit und Verteilung ab. Am Beispiel von Holz lassen sich diese Phänomene gut erklären. So ist die Schwierigkeit, einen Holzbalken anzuzünden und das nachfolgend langsame Abbrandverhalten bekannt. Im Gegensatz dazu lässt sich ein Ballen Holzwole sehr leicht entzünden; dieser brennt dann rasant ab. Ganz fein verteiltes Holz in Form von Feinstaub ist in aufgewirbelter Form sogar explosionsfähig.

Da das Brandverhalten von allen Materialien sehr komplex und deshalb schwer zu beschreiben ist, sind definierte Prüfverfahren entwickelt worden, die bei der Prüfung sehr genau eingehalten werden müssen. Für die unterschiedlichen Anwendungsbereiche gibt es eine große Anzahl nationaler und internationaler Prüfnormen. Wegen der besonderen Bedeutung wird in dieser Information lediglich auf die Prüfung von Baustoffen hinsicht-

lich ihres Brandverhaltens nach DIN 4102-1 Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen; Baustoffe, Begriffe, Anforderungen und Prüfungen vom Mai 1998 verwiesen. Danach werden brennbare Baustoffe in die folgenden drei Klassen eingeteilt:

- B 1 schwer entflammbar
- B 2 normal entflammbar
- B 3 leicht entflammbar

Auf die Brennbarkeit von Kunststoffen hat die spezifische Oberfläche eine starke Auswirkung. Dies wird besonders deutlich bei Schaumkunststoffen und doppelwandigen Lager- und Transporthilfsmitteln (siehe Abschnitt 3.2). So ist zum einen eine bessere Zündwilligkeit und zum anderen eine schnellere Brandentwicklung als beim kompakten Kunststoff gegeben. Daneben wird auch die Brandbekämpfung durch automatische Wasserlöschanlagen oder die Feuerwehr erschwert.

Da die Kunststoffe trotz des ihnen gemeinsamen Kohlenstoffgerüsts in ihrem chemischen Aufbau unterschiedlich sind, können auch die thermischen und mechanischen Eigenschaften sowie die Brandeigenschaften stark differieren.

Die Entzündbarkeit des Stoffes und die Brandentwicklung in der Anfangsphase sind entscheidende Parameter für die Brandentstehung und den Brandverlauf. Darüber hinaus ist die pro Gewichts- oder Volumeneinheit abgegebene Wärmeenergie und die Verbrennungswärme eine wesentliche Größe. Deshalb wird die Höhe der Brandlast, die aus der Verbrennungsenergie bezogen auf die Fläche eines Nutzungsbereiches (z.B. Lagerraum) ermittelt wird, als eine wesentliche Größe zur Beurteilung des baulichen und anlagentechnischen Brandschutzes herangezogen.

Niedrige Entflammungs- und Entzündungstemperaturen erleichtern die Möglichkeit zur Zündung bei relativ niedrigen Temperaturen aber auch das leichtere Fortschreiten des Brandes in seiner Anfangsphase. Ob es in der Praxis zur Zündung kommt, hängt unter anderem von der Zündquelle, also z.B. einer offenen Flamme (Streichholz usw.), einer glimmenden Zigarette, einer heißen Oberfläche oder der Wärmestrahlung ab.

Hohe Verbrennungswärmen (Heizwerte) begünstigen einen schnellen Brandverlauf, in dem die Wärme des Brandes die noch nicht vom Brand betroffenen Bereiche aufheizt und Zersetzungs-, das heißt Pyrolyseprozesse, in Gang setzt. Dabei können durch starke Hitzeeinwirkungen große Mengen an brennbaren Gasen gebildet werden, die ei-

nen Feuerübersprung auf alles brennbare Material bewirken können. Solch ein Vorgang kann unter günstigen Voraussetzungen explosionsartig ablaufen. Ein spontaner explosionsartiger Feuerübersprung (Flash over) kann dann stattfinden, wenn sich große Mengen und hohe Konzentrationen brennbarer Gase unter Sauerstoffmangel bilden konnten und durch plötzliche Ereignisse Luft-sauerstoff zum Brandgeschehen tritt.

Die Heizwerte vieler Massenkunststoffe, mit Ausnahme von PVC und PTFE, liegen über 30 MJ/kg. Zum Vergleich besitzt Heizöl einen Heizwert von 42,8 MJ/kg, Kohle liegt im Heizwert zwischen 27 und 33 MJ/kg und Papier und Holz nur noch bei Werten unter 20 MJ/kg. Diese Zahlen veranschaulichen den großen Energieinhalt dieser Kunststoffe gegenüber bekannten Brennstoffen und Mate-

Stoff	Heizwert in MJ/kg
<i>Kunststoffe</i>	
Polyethylen (PE)	46,1
Polypropylen (PP)	44,0
Polystyrol (PS), schlagfest	40,2
Polyamid (PA)	31,0
Polycarbonat (PC)	30,6
Polyvinylchlorid (PVC)	18,0
Polytetrafluorethylen (PTFE)	4,2
<i>Naturstoffe</i>	
Heizöl	42,8
Kohle	27,2 - 33,5
Holz	18,4 - 18,6
Papier	16,8

Tabelle 3: Heizwerte einiger Kunst- und Naturstoffe

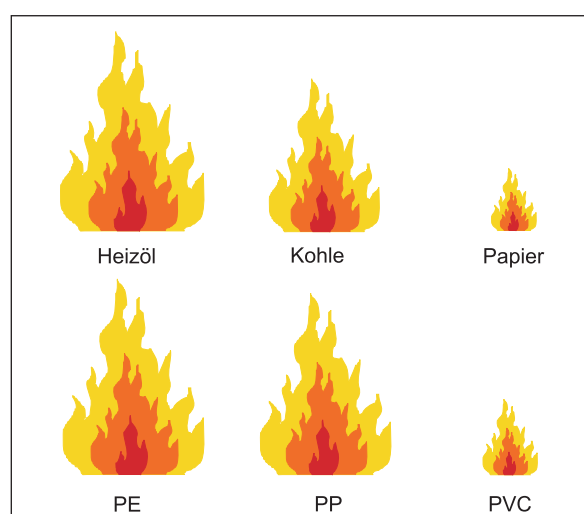


Abbildung 2: Symbolhafte Darstellung des Energieinhaltes ausgewählter Stoffe

rialien. In Tabelle 3 sind die Heizwerte einiger Kunststoffe und Naturstoffe zusammengestellt.

Anders als bei vielen brennbaren festen Materialien, z.B. Holz, weisen thermoplastische Kunststoffe eine niedrigere Erweichungstemperatur und ein damit verbundenes Schmelzen auf. Durch im Brandfall geschmolzenen Kunststoff kann das Brandgeschehen oft sehr nachteilig beeinflusst werden. Bei der Lagerung oder im Deckenbereich angebrachten schmelzbaren Kunststoffen kann durch den nach unten fließenden bzw. abtropfenden brennenden Kunststoff eine Lache gebildet werden, die eine Unterfeuerung der betreffenden Bereiche zur Folge hat und damit zur Brandausbreitung beitragen kann. Hierdurch kommt es neben der normalen horizontalen und vertikalen Brandausbreitung von unten nach oben zu einer zusätzlichen Brandausbreitung in umgekehrter vertikaler Richtung (von oben nach unten). Nicht alle schmelzbaren Kunststoffe tropfen auch brennend ab. Diese Eigenschaft kann durch Zusatzstoffe unterdrückt werden.

Die Kombination von leichter Entflammbarkeit, hoher Verbrennungswärme und einer oftmals speziellen Formgebung, kann zu einem gegenüber anderen Stoffen wesentlich rascheren und intensiveren Brandverlauf führen.

Nachfolgend sind Eigenschaften vieler Kunststoffe aufgeführt, die im Brandfall das Schadenausmaß nachteilig beeinflussen können:

- niedrige Erweichungs- und Schmelztemperaturen (siehe Tabelle 4)
- Schmelzen, Abtropfen, Abfließen, Lachenbildung
- brennendes Abtropfen
- niedrige Entflammungstemperatur, d.h. leichte Brennbarkeit (siehe Tabelle 4)
- hohe Verbrennungswärmen (siehe Tabelle 4)
- starke Rußbildung (siehe Tabelle 6)
- Bildung korrosiver oder toxischer Gase (siehe Tabelle 6)

Diese Eigenschaften sind jedoch nicht bei allen Kunststoffen und nicht immer vollständig vorhanden.

Bei Kunststoffen im Gemisch mit brennbaren Lösungsmitteln, z.B. Klebern und Lacken, wird die Brennbarkeit im Wesentlichen vom Lösungsmittel bestimmt. Auch haben die flüssigen bzw. pastenförmigen Kunststoffrohprodukte zur Herstellung von Mehrkomponentenkunststoffen in der Regel niedrigere Entzündungstemperaturen als die daraus ge-

Kunststoff (Kurzzeichen, vgl. Tabelle 1)	Erweichungs- temperatur- bereiche (nach Vicat)	Zersetzungs- temperatur	Entflammungs- temperatur ¹⁾	Entzün- dungstem- peratur ²⁾	Verbren- nungs- wärme ³⁾	Dichte
	°C	°C	°C	°C	MJ/kg	g/cm ³
PE	60 –70	340 - 440	340	350	46,5	0,92 - 0,96
PP	85- 90	330 - 410	350 - 370	390 - 410	46,0	0,91
PS	88	300 - 400	340 - 350	490	42,0	1,05
PVC	70-80	200 - 300	390	455	20,0	1,40
PU - Hartschaum	180	220	310	415	n.b.	1,2
PA 6	200	300 - 350	420	450	32,0	1,13
PA 66	250	320 - 400	490	530	32,0	1,14
PC	150-155	350 - 400	520	keine Entz.	31,0	1,20
PTFE	110	500 - 550	560	580	4,5	2,20
POM	170	220	350 - 400	ca. 400	17,0	1,42
ABS	90 – 121	-	390	480	36,0	1,02 - 1,07
PETP	80	285 - 305	440	480	21,5	1,34
PMMA	84 – 108	170 - 300	300	450	26,0	1,18
PAN	78 – 81	250 - 300	480	560	n.b.	1,15 - 1,17

n.b. = nicht bestimmbar

¹⁾ Entflammungstemperatur: Niedrigste Temperatur eines Materials, bei der unter festgelegten Prüfbedingungen die sich bildenden brennbaren Gase mit einer Zündquelle entzündet werden können.

²⁾ Entzündungstemperatur: Niedrigste Temperatur eines Materials, bei der unter festgelegten Prüfbedingungen eine anhaltende Verbrennung eingeleitet werden kann.

³⁾ Verbrennungswärme: Wärmemenge, die bei der Verbrennung eines Materials unter bestimmten Prüfbedingungen frei wird.

Tabelle 4: Physikalisch-chemische Eigenschaften der häufigsten Kunststoffe (ohne Zuschlagstoffe)

bildeten Kunststoffe und können deshalb zur schnelleren Ausbreitung eines Brandes führen.

Während Thermoplaste und Elastomere schon durch ein geringes Stützfeuer in Brand gesetzt werden können und zu einer raschen Brandfortleitung führen, sind Duroplaste nur schwer in Brand zu setzen. Das Brandverhalten der Duroplaste kommt den Glutbildnern (wie z.B. Holz) sehr nahe. Hingegen gehört die Mehrzahl der Elastomere zu den leicht brennbaren Stoffen. Allen Elastomeren und Thermoplasten ist zu Eigen, dass sie im Brandfall sehr rasch ihre Formstabilität verlieren.

Tabelle 4 gibt einen Überblick über die physikalisch-chemischen Eigenschaften der häufigsten Kunststoffe ohne Zuschlagstoffe. Heizwerte (siehe Tabelle 3) und Verbrennungswärmen (Tabelle 4) werden unterschiedlich ermittelt und weichen daher geringfügig voneinander ab.

3.2 Einfluss der Formgebung und der Menge auf den Brandverlauf

Wie bereits unter Abschnitt 3.1 erwähnt, nimmt die Formgebung und die Menge jedes brennbaren Stoffes einen enormen Einfluss auf den Brandver-

lauf. Fein in der Luft verteilte Stäube brennbarer Materialien können rasant abbrennen oder, je nach Korngröße, sogar explodieren, wie dies allgemein auch für Stoffe wie Mehl oder Kohle bekannt ist.

Grund für die rasante Abbrandgeschwindigkeit bei bestimmten Formgebungen ist die Tatsache, dass der zur Verbrennung notwendige Luftsauerstoff in ausreichender Menge an die Oberfläche der festen Phase gelangen kann und gleichzeitig die Verbrennungsgase entweichen können. Solche Bedingungen werden als für die Verbrennung günstiges Oberfläche zu Masse (oder Volumen) Verhältnis bezeichnet.

Bei vielen Kunststoffherzeugnissen liegt ein Oberfläche zu Masse (oder Volumen) Verhältnis vor, welches das Brandverhalten ungünstig beeinflusst. Besonders hervorzuheben sind dabei Schaumkunststoffe, doppelwandige Lager- und Transporthilfsmittel und Kunstfasern (siehe Abschnitt 4.1).

Beim Brand von Kunststoffen werden die Makromoleküle der Kunststoffe durch die Zündflamme thermisch gespalten. Diese Energie wird nach der Zündung aus der Verbrennung selbst geliefert.

Die Zersetzungsgase (Pyrolysegase) sind der eigentliche Brennstoff, der in Verbindung mit dem Luftsauerstoff brennt. Durch besondere Formgebung oder Anordnung können unverbrannte Pyrolysegase von ihrem Entstehungsort an andere Stellen ziehen und dort brennen. Dies ist bei doppelwandigen Kunststoffherzeugnissen aus Thermoplasten, wie sie in der Lagerhaltung Verwendung finden, der Fall.

In den Zwischenräumen solcher Erzeugnisse werden brennbare Gase erzeugt, die an offenen Stellen austreten und über den normalen Brand hinaus zu einer Verstärkung des Brandes beitragen können.

Ein vergleichbarer Effekt kann in Zwischenräumen von unterfeuerten Decken in Gebäuden auftreten, wo brennbare Pyrolysegase zur Brandausbreitung beitragen können oder sogar nach Ansammlung in einem noch nicht vom Brand betroffenen Bereich explodieren können.

Darüber hinaus können die Formgebung und die leichte Erweichbarkeit von Thermoplasten auch einen Einfluss auf die Standfestigkeit haben.

Natürlich hat auch die Menge der am Brand beteiligten Stoffe einen entscheidenden Einfluss auf das gesamte Brandgeschehen. Am Beispiel von Kunststoffen, die mit Flammenschutzmittel ausgerüstet sind, sei dies verdeutlicht.

Die Entzündbarkeit von Kunststoffen mit Flamm- schutzrüstung ist deutlich erniedrigt und auch die Brandentwicklungsphase verläuft langsamer, als bei nicht mit Flammenschutzmitteln ausgerüsteten Kunststoffen. Bei dichter Lagerung und großen Mengen liegen jedoch günstige Verhältnisse für eine thermische Aufbereitung großer Mengen vor, so dass es durch den so genannten Feuerübergang (Flash over) zum Vollbrand kommen kann.

3.3 Brandverhalten beim Zusammenwirken verschiedener Stoffe

Reine Kunststoffbrände sind selten. Meist werden Kunststoffe zusammen mit anderen Materialien wie Papier, Kartonagen, Holz (Paletten) sowie sonstigen brennbaren Waren und Gütern gelagert. Ein besonderes Gefahrenpotenzial beinhaltet die Lagerung brennbarer Flüssigkeiten in Kunststoffbehältnissen. Leere brennbare Verpackungsmaterialien und Lagerhilfsmittel (Paletten), die das Brandverhalten negativ beeinflussen, sollten nicht mit anderen brennbaren Stoffen zusammen gelagert werden.

Bei einem Brand, ausgehend von brennbaren Materialien, die als Stützfeuer dienen können, können auch schwer entflammable Kunststoffe mit niedrigem Heizwert (PTFE, PVC) brennen und darüber hinaus zu einer Vergrößerung des Schadens durch weiträumige Korrosion beitragen. Dies wird durch folgendes Beispiel deutlich: Hart-PVC ist wegen des hohen Chlorgehaltes schwer entflammbar, spaltet jedoch unter Wärmeeinwirkung schon bei Temperaturen um 150 °C Chlorwasserstoffgas (Salzsäuregas; siehe Abschnitt 5.1) ab und brennt unter Beteiligung (Stützfeuer) leichter brennbarer Stoffe. Ein solches Stützfeuer können Kunststoffe wie PE und PP liefern.

4 Lagerung, Verarbeitung und Verwendung

4.1 Gefahren bei der Lagerung

Lagerbrände verursachen häufig hohe Sachschäden und Betriebsunterbrechungen, denn durch den Ausfall eines Zwischenlagers kann die ganze Produktion oder der Vertrieb zum Stillstand kommen. Umfassende Brandschutzempfehlungen gibt die Broschüre [VdS 2199](#) Brandschutz im Lager.

Durch die vielfach sehr großflächigen und großvolumigen Lagerbereiche können sogar in einem sehr frühen Stadium gelöschte Brände den gesamten Lagerbestand durch Beaufschlagung mit Ruß oder korrosiven Gasen vernichten. Darüber hinaus können die bei Lagerbränden entstehenden Brandfolgeprodukte zu einer erheblichen Beeinträchtigung der Umwelt führen. Diese Gefahren bestehen grundsätzlich auch bei der Lagerung von Kunststoffen. Stark rußende Kunststoffe (z.B. PS) und halogenhaltige Kunststoffe (z.B. PVC) führen zu einer Gefahrenerhöhung.

Während für einige Kunststoffe, insbesondere für die Duroplaste, das Brandverhalten dem Holz gleichgestellt und von der Feuerwehr ohne weiteres beherrscht werden kann, gehen besondere Gefahren von Lägern aus, in denen eine nicht sachgerechte bzw. nicht ordnungsgemäße Lagerung großer Mengen an verschiedenen Kunststoffen vorliegt. Die bei Kunststoffen oft auftretende leichte Entflammbarkeit und hohe Heizwerte, können dazu führen, dass Kunststoffbrände häufig sehr schnell hohe Temperaturen erreichen und sich die Entwicklung zum Vollbrand in wenigen Minuten vollzieht.

Eine der wichtigsten prophylaktischen Maßnahmen zur Schadenminderung ist eine konsequente Trennung der gelagerten Stoffe (inklusive der

Kunststoffe) nach ihren stofflichen Eigenschaften und ihrer Art bzw. Form (Folien, Formteile usw.).

Grundsätzlich dürfen Stoffe, die in gefährlicher Weise miteinander reagieren können, nicht ohne entsprechende Schutzmaßnahmen zusammen gelagert werden. Stoffe mit unterschiedlichen Gefahrenmerkmalen dürfen nur zusammen gelagert werden, wenn die Schutzmaßnahmen auf die gefährlichste Stoffeigenschaft abgestimmt sind und für die anderen Stoffe bzw. Stoffeigenschaften ebenfalls geeignet sind. So kann beispielsweise ein für Stoff A geeignetes Löschmittel bei Stoff B in seiner Löschwirkung versagen oder gar zu gefährlichen Reaktionen mit dem Lagergut führen. Eine getrennte Lagerung ermöglicht die gezielte Abstimmung der Schutzmaßnahmen auf das vorliegende Gefahrenpotenzial.

Eine Zusammenlagerung von Stoffen, die normal- und schwer entflammbar sind, jedoch im Brandfall korrosive oder toxische Gase bilden können, mit leicht entflammaren Stoffen führt zu einer erheblichen Erhöhung des Gefahrenpotenzials (siehe Abschnitt 3.3). Die Zusammenlagerung unterschiedlicher Stoffe sollte nicht dazu führen, dass die Anzahl der potenziellen Gefahren erhöht oder eine Gefahr in hohem Maße verstärkt wird. Als Eigenschaften, die eine Gefährdung herbeiführen können, sind hierbei zu berücksichtigen:

- Brandverhalten nach DIN 4102-1
- Entflammungs- und Entzündungstemperatur
- Fließverhalten bei Erwärmung (Erweichungs- und Schmelztemperatur)
- Bildung korrosiver oder toxischer Gase
- Bildung Wasser gefährdender Stoffe

Zusätzlich ist die Verbrennungswärme (Heizwert) als ein Indiz dafür zu betrachten, ob die Energie im Brandfall ausreicht, andere gefährliche Reaktionen in Gang zu setzen. Es ist auch die mögliche Reaktion der Brandfolgeprodukte zu berücksichtigen.

Regelungen für die Zusammenlagerung in Abhängigkeit der Stoffgefahren und -menge sind unter anderem in den folgenden gesetzlichen Vorschriften aufgeführt:

- Technische Regeln Druckgase, TRG 280 Allgemeine Anforderungen an Druckgasbehälter; Betreiben von Druckgasbehältern
- Technische Regeln für brennbare Flüssigkeiten, TRbF 110 Lager, Gefahrklassen A I; A II; B
- Technische Regeln für brennbare Flüssigkeiten, TRbF 210 Lager, Gefahrklasse A III

- Technische Regeln für Gefahrstoffe, TRGS 514 Lagern sehr giftiger und giftiger Stoffe in Verpackungen und ortsbeweglichen Behältern
- Technische Regeln für Gefahrstoffe, TRGS 515 Lagern brandfördernder Stoffe in Verpackungen und ortsbeweglichen Behältern

Innerhalb der Gruppe der Thermoplaste sollte eine konsequente Trennung zwischen halogenhaltigen Kunststoffen und halogenfreien Kunststoffen beachtet werden. Die Lagerabschnitte sollten entweder räumlich oder durch Brandwände voneinander getrennt werden.

Brandschutztechnische Regelungen sind unter anderem folgenden Regelwerken zu entnehmen:

- [VdS 2199](#) Brandschutz im Lager
- [VdS 2000](#) Brandschutz im Betrieb

Speziell für Kunststoff-Recycling-Betriebe sind brandschutztechnische Regelungen zu entnehmen aus:

- [VdS 2513](#) Brandschutztechnische Richtlinien für die Lagerung von Sekundärrohstoffen aus Kunststoff
- [VdS 2517](#) Sortierung, Aufbereitung und Lagerung von brennbaren Sekundärrohstoffen, Richtlinien für den Brandschutz

4.2 Gefahren bei der Verarbeitung

Zu Kunststoff-Endprodukten werden entweder Granulate oder Rohstoffe in flüssiger bis pastöser Form verarbeitet. Wegen der schon erwähnten unterschiedlichen Eigenschaften der Thermoplaste, Duroplaste und Elastomere und der sehr unterschiedlichen Formgebung, von der Folie bis zum Schaumstoffblock, gibt es eine Vielzahl von Verarbeitungsverfahren.

Die Verarbeitung von Kunststoffen findet häufig in kleinen bis mittleren Betrieben statt. Typisch für die Verarbeitung ist der hohe Automatisationsgrad. Dadurch ist nur eine geringe bzw. zeitweilig gar keine Beaufsichtigung durch Personen gegeben, wodurch eine Brandentstehung oft nicht frühzeitig genug erkannt wird.

Die Kunststoffverarbeitung birgt Risiken durch die thermischen und mechanischen Verfahren sowie die Verwendung von entflammaren Flüssigkeiten im Umgang mit den thermisch zersetzbaren und dann leicht entzündbaren Kunststoffen in sich. Auch können Rohstoffe in entflammaren Flüssigkeiten gelöst und zur Weiterverarbeitung, wie zum Lackieren und Bedrucken, eingesetzt werden.

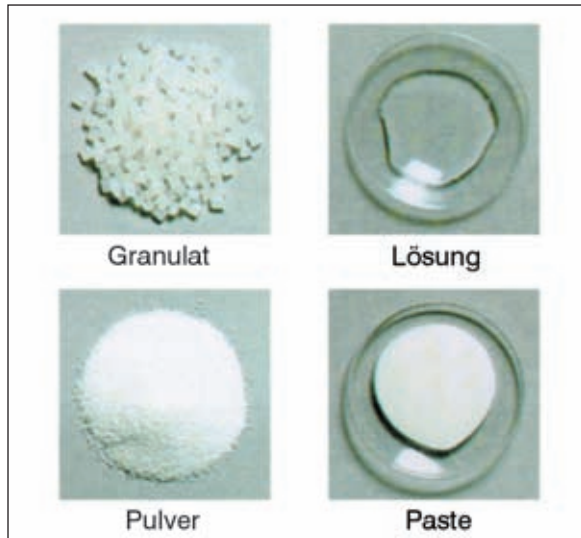


Abbildung 3: Ausgangsmaterialien für die Kunststoffverarbeitung

Viele Verarbeitungsprozesse laufen bei erhöhten Temperaturen ab, so dass eine darüber hinausgehende Erwärmung zu einer Entzündung führen kann. Heiße Oberflächen durch elektrische Begleitheizung, Wärmeträgeröle und thermische Überhitzung an Austrittsdüsen können zur Entzündung führen.

Weiterhin ist als Zündquelle auch die Überhitzung durch mechanische Einwirkung, chemische Reaktion von Kunststoff-Rohprodukten oder auch durch Aushärten großer Formstücke in Betracht zu ziehen. Bei bestimmten Reaktionskunststoffen ist unter den Bedingungen einer ungenügenden Reaktionswärmeabfuhr sogar eine Selbstentzündung möglich, wie z.B. beim Aushärten geschäumter PU-Schaumstoffblöcke.

Großflächige Staubablagerungen stellen grundsätzlich eine Brand- und Explosionsgefahr dar. Durch Aufwirbelung der Staubablagerung kann sich bei einer entsprechenden Partikelgröße und Verteilung der Partikel in der Luft ein explosionsfähiges Gemisch bilden. Darüber hinaus können durch die Verwendung brennbarer Flüssigkeiten bzw. Gase als Treibmittel beim Schäumen von Kunststoffen besondere Brand- und Explosionsgefahren entstehen.

In Tabelle 5 sind die typischen Brandgefahren einiger Bearbeitungsverfahren aufgeführt.

Im Folgenden werden die gängigen Kunststoff-Verarbeitungsverfahren beschrieben.

Verfahren	Typische Gefahren
Extrudieren	Hoher Druck und eventuell hohe Temperatur kann - insbesondere bei Maschinenstörung - zum Brand des verarbeiteten Kunststoffes führen.
Folienziehen	Elektrostatische Aufladung
Spritzgießen	Bei der Verwendung von Hydraulikflüssigkeiten ist auf Leckagen zu achten.
Schäumen	Das gefährlichste Verfahren der Verarbeitung, da aufgrund von Fehldosierungen die Reaktion zu einer Selbstentzündung des geschäumten Blocks führen kann. Aus Gründen des Umweltschutzes werden heute vielfach brennbare und explosionsgefährliche Kohlenwasserstoffe zum Schäumen verwendet.
Abflammen	Entzündungsgefahr durch die Verwendung einer Gasflamme.

Tabelle 5: Brandgefahren bei einigen Kunststoffverarbeitungsverfahren

Fördern von festen Rohstoffen

Die Granulate und Pulver zur Herstellung der Kunststoffe werden in der Regel in Silos und Bunkern gelagert. Die Weiterförderung zu Tagesbehältern, Wäge- und Dosiereinrichtungen erfolgt insbesondere bei großen Fördermengen pneumatisch. Weitere Geräte zur Förderung können aber auch beispielsweise Bandförderer, Vibrations-Dosierriemen oder Schneckenfördersysteme sein.

Bei der Lagerung und Beförderung von Pulver und Granulat besteht die Gefahr, dass explosionsfähige Staub-Luft-Gemische entstehen. Aus diesem Grund sind Maßnahmen zur Vermeidung von Zündquellen, insbesondere auch gegen elektrostatische Aufladungen, zu treffen. Eine weitere Möglichkeit der Verhinderung von Staubexplosionen besteht in der Intertisierung (Einleiten von Inertgasen wie z.B. Stickstoff) der Anlagenkomponenten.

Die Förderung von festen Rohstoffen ist in der Regel für die im Folgenden aufgeführten Verfahren notwendig.

Extrudieren

Zur Herstellung von Rohren, Platten und Profilen dient häufig ein Extruder. In seinem beheizten Zylinder wird thermoplastisches Kunststoffgranulat aufgeschmolzen und durch den Druck der Schnecke verdichtet. Die Kunststoffschmelze wird unter großem Druck durch eine Düse gepresst, die dem Profil der Kunststoffformteile entspricht. Im nachgeschalteten Wasserbad erfolgt die Kühlung und Erhärtung. Ebenso ist das Extrudieren zu Struktur-

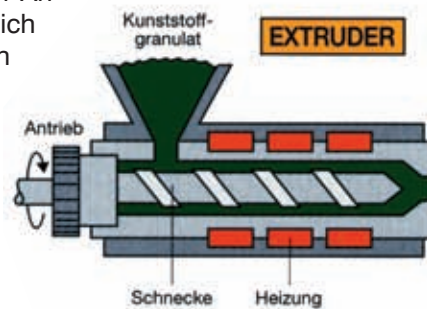
schaumprofilen durch Einsatz eines Treibmittels möglich. Das Treibmittel kann durch chemische Reaktion entstehen oder durch Direktbegasen der Schmelze zugeführt werden.

Herstellung von Folien

Zur Herstellung von Schlauchfolien wird die Schmelze aus thermoplastischem Kunststoff durch eine Flachdüse gepresst. Mit Innenluft kann gekühlt und das Aufblaseverhältnis geregelt werden. Entsprechend dem Verwendungszweck wird die Schlauchfolie nach dem Erkalten aufgewickelt. Diese Technik eignet sich beim Einsatz von Flachdüsen auch zur Herstellung von Flachfolien, z.B. von PS-Schaumfolien. Darüber hinaus lassen sich durch den Einsatz mehrerer Extruder Verbundfolien herstellen. Aus Schlauch- und Flachfolien werden häufig konfektionierte Folien hergestellt.

Beschichten

In einer Beschichtungsapparatur werden Papiere, Gewebeunterlagen oder ähnliche Materialien, zum Teil im Verbund mit Aluminiumfolien, je nach Anforderungen, die sich aus ihrem späteren Anwendungsbereich ergeben, mit einer Kunststoffschicht aus Thermoplasten überzogen. Mit einem Rotationsdruck nach der Beschichtung lassen sich die Mehrschicht-Verbundfolien bedrucken und prägen.



Spritzgießen

Als Rohmaterial dienen in der Regel thermoplastische Kunststoffe. Es können jedoch auch duroplastische Kunststoffe gespritzt werden. Das Granulat wird in einer Schneckenpresse plastifiziert, komprimiert und mittels des Presszylinders in eine Stahlform gespritzt.

Extrusionsblasen (Blasen von Hohlkörpern)

Über einen Extruder werden thermoplastische Kunststoffe komprimiert und in Formen zu einem dünnwandigen Rohr (Vorformling) gespritzt. Der noch warme Rohrabchnitt wird anschließend in eine Blasform eingespannt und dort durch Aufblasen mit Pressluft umgeformt. Dabei kühlt der Thermoplast ab und erhärtet. Das Verfahren (Spritzblasen bzw. Streckblasen) kann für viele Hohlkörper unterschiedlichster Größe und Form angewandt werden.

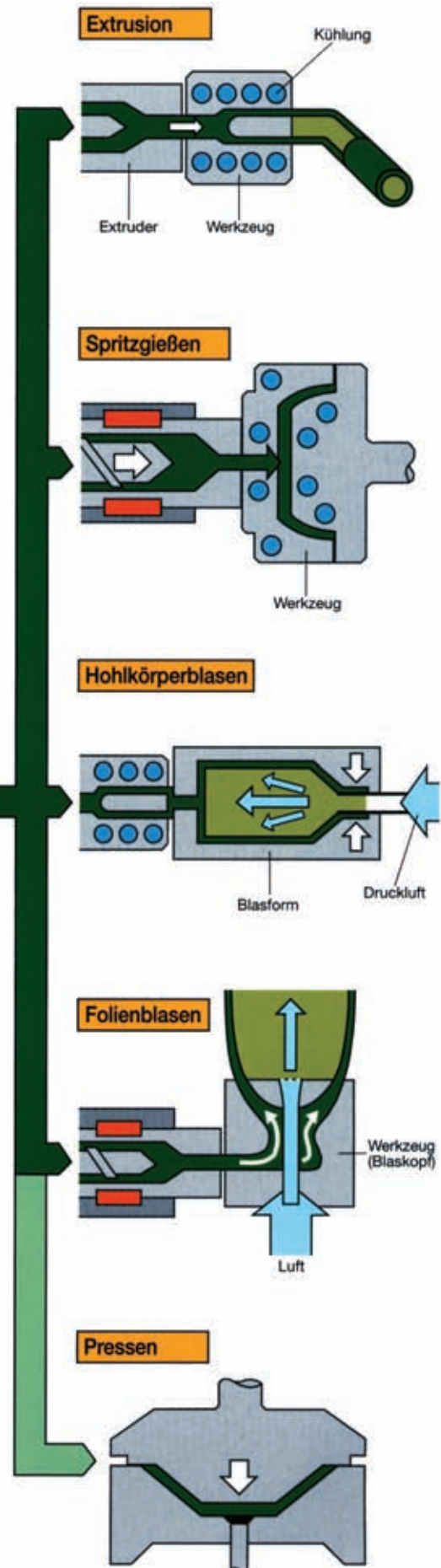


Abbildung 4 : Verfahren zur Verarbeitung von Kunststoffen

Gießen

Flüssige, langsam aushärtende Duroplaste können als kalt oder warm vernetzbare Reaktionsharzmassen in offenen Formen zu Tafeln, Rohren oder anderen Profilen gegossen werden.

Schichtpressen und Laminieren

Die Trägerbahnen von Schichtpressstoffen, z.B. Hartpapier, Hartmatten, Hartgewebe, werden in kontinuierlich arbeitenden Anlagen mit Lösungen heiß härtpbarer Harze getränkt, getrocknet und für Tafeln und Bögen zugeschnitten. Anschließend werden mehrere Pakete übereinander geschichteter imprägnierter Bögen den Etagen der Hochdruckpresse zugeführt. Bei Temperaturen bis 180 °C und Drücken bis zu 200 bar verschweißen die Bahnen innerhalb 30 bis 60 Minuten zur Schichtpressstofftafel.

Kalandern von Kunststoff-Folien

In Mehrwalzen-Kalanderanlagen wird typischerweise PVC (hart und weich) zu Folien verarbeitet. Über einen Mischer und den Extruder gelangt die Schmelze auf die Walzwerke. Nach dem Auswalzen zu einer Folie kann durch nachgeschaltete Prägekalander und Druckmaschinen eine weitere Form- und Farbgebung erfolgen.

Tiefziehen und Vakuumverformung

Großflächige Teile, wie z.B. Fassadenelemente aus hochschlagzähem PVC, Langfeldleuchten-Abdeckungen aus Acrylglas, Kühlschranksgehäuse, Fahrzeug-Ausstattungssteile, werden durch großformatige Warmformmaschinen produziert. Dazu wird das extrudierte Plattenmaterial in einem Rahmen fixiert, mit Infrarotstrahlern aufgeheizt und anschließend mit einem Stempel in eine Form gepresst. Dabei gleitet das eingegebene Material auf der gleichzeitig eingeblassenen Warmluft. Anschließend wird der Formling mit Vakuum an die Wandung der Form gesaugt. Durch Wasserdampf oder kalte Pressluft erkaltet der Formling und kann entnommen werden.

Kleinere Formteile werden im Rotations-Tiefziehverfahren in kleinformatischen Maschinen zur Serienfertigung hergestellt. Dabei laufen die Verfahrensschritte kontinuierlich in einer Vakuum-Trommel ab.

Rotationsformen und Schleudergießen

Aus verschiedenen Thermoplasten in Pulver- oder Granulatform werden symmetrische und unregelmäßig geformte Gegenstände, z.B. Bälle, Spielzeuge, Verkehrskegel, Schwergutverpackungen, Kabeltrommeln und Kraftfahrzeugtanks, im Schalen-guss hergestellt. Im Schleuderguss werden dickwandige

kompakte Gegenstände, z.B. Zahnräder, aus reagierenden Kunststoffen produziert.

Schäumen

Schaumkunststoffe werden aus einer Vielzahl von Kunststoffen in unterschiedlichen Verfahren hergestellt. Aus brandschutztechnischer Sicht können die Verfahren sinnvollerweise hinsichtlich des verwendeten Treibmittels unterschieden werden.

Zum einen existieren Verfahren, bei denen Treibmittel in Form leicht verdampfbarer Flüssigkeiten oder chemischer Substanzen, die sich bei höheren Temperaturen zu inerten Gasen zersetzen, eingesetzt werden. Zum anderen können Treibmittel durch Abspaltung kleiner Moleküle, die sich bei der Reaktion zweier Kunststoffrohstoffe bilden, entstehen.

Auf Grund gesetzlicher Bestimmungen zum Umweltschutz wurden die schwer brennbaren oder nichtbrennbaren Fluorchlorkohlenwasserstoffe bzw. Chlorkohlenwasserstoffe als Treibmittel durch die brennbaren und explosionsfähigen Kohlenwasserstoffe verdrängt.

Da die Verfahren sehr unterschiedlich sind und darüber hinaus eine Vielzahl von Varianten aufweisen, würde die Beschreibung aller Verfahren den Rahmen dieser Technischen Informationen sprengen.

Verkleben oder Verschweißen

Vorgefertigte Kunststoffteile können durch Verkleben oder Verschweißen zu komplexeren Formteilen verbunden werden. Beim Verkleben werden häufig Lösemitteldämpfe freigesetzt; dies können gesundheitsgefährdende bzw. Wasser gefährdende Stoffe sein.

Zum Verschweißen müssen die Kunststoffe auf ihre Schmelztemperatur erhitzt werden. Hierzu werden häufig Schweißextruder eingesetzt. Kunststoffe mit einer Flammschutz-ausrüstung können bei diesen Temperaturen toxische Stoffe freisetzen.

Sowohl zur Entfernung der brennbaren Lösemitteldämpfe (die schwerer als Luft sind) beim Verkleben, als auch zur Entfernung möglicher toxischer Ausgasungen beim Verschweißen, sollten geeignete Absaugeinrichtungen vorhanden sein.

Abflammen

Eine verbreitete Methode zur optischen Korrektur von Bearbeitungsspuren auf glatten Oberflächen von Thermoplasten ist das Abflammen mit einer Gasflamme. Auf Grund der Brandgefahr sollten hierbei geeignete Löscheinrichtungen zur Verfügung stehen.

Schneiden und Sägen

Die Herstellung von Spezialteilen, z.B. Lüftungskanälen und großflächigen Profilen, erfolgt vielfach durch Schneiden und Sägen aus großen Kunststoffplatten. Hierbei entstehen Späne und Stäube, die die Brandentstehung begünstigen können. Deshalb sind diese durch eine Absaugung zu entfernen.

4.3 Gefahren bei der Verwendung

Kunststoffe werden in allen privaten, gewerblichen und industriellen Bereichen verwendet. Einer der wesentlichen Anwendungsbereiche sind Verpackungen aller Art einschließlich der Transporthilfsmittel. Dadurch haben sich in vielen Bereichen die Brandlasten und in speziellen Fällen auch die Brandgefahren erhöht.

Beispielhaft erwähnt sei hier der Einsatz von Folien (auch Schrumpffolien), von Polystyrol in Form von Hartschaumverpackungen und Chips sowie die Verwendung von Kunststoffformteilen mit gleichzeitiger Funktion als Verpackungs-, Lager- und Transporthilfsmittel; typisch hierfür sind Kästen für Getränkeflaschen oder Kleinteile.

Besondere Brandgefahren können durch das Zusammenwirken mehrerer ungünstiger Eigenschaften (siehe Abschnitt 3.1) bzw. Einflüsse zu Stande kommen. Dies ist insbesondere bei Lager- und Transporthilfsmitteln aus Polypropylen und Polyethylen, wie den meisten aus Polypropylen hergestellten Kleinladungsträgern (KLT), der Fall. Hierbei wird zusätzlich noch die Brandbekämpfung mit dem Löschmittel Wasser erschwert. Die sehr geringe Benetzbarkeit der KLT mit reinem Wasser und der Abschirmeffekt der aufeinander gestapelten Kleinladungsträger erlauben nur dann eine effektive Brandbekämpfung, wenn zusätzliche Maßnahmen getroffen werden. Eine dieser Maßnahmen ist die Zumischung von filmbildenden Schaummitteln zum Löschwasser.

4.4 Wiederverwendung

Die vielfältigen Verwendungsmöglichkeiten von Kunststoffen mit Eigenschaften, die an den Anwendungsfall genau angepasst sind, haben ihren Einsatz in den vergangenen Jahren stark ansteigen lassen. Zugleich wuchs auch die Problematik der Entsorgung. Knapper werdender Deponieraum und die daraus resultierenden hohen Entsorgungskosten führte zunehmend zur Forderung nach geeigneten Verwertungsverfahren. Diese können in werkstoffliche, rohstoffliche und thermische (Verbrennung) Verwertungsverfahren unterschieden werden.

Werkstoffliche Verwertung umfasst die Bereiche Sortierung und Aufbereitung der Kunststoffe. Zur Sortierung gehören insbesondere die Trennung der Kunststoffe von Fremdmaterialien und nach Typen (sortenreine Kunststoffe), Shredderung und Ballenpressung. Der Bereich Aufbereitung beinhaltet die Stufen Reinigung, Trocknung, Zerkleinerung (Mahlen, Granulieren, Pulverisieren), Einschmelzung und Abfüllung.

Zur **rohstofflichen Verwertung** werden alle chemischen Verfahren gerechnet, z.B. Hydrierung, Pyrolyse und Depolymerisation.

Allen Verwertungsbetrieben gemeinsam ist die Lagerung der Kunststoffe. Läger stellen zusätzliche Bereiche mit hohen Brandlasten dar und müssen daher in Brandschutz-Konzepten besondere Beachtung finden. Auf entsprechende brandschutztechnische Richtlinien wird in Abschnitt 4.1 verwiesen.

4.5 Brandschutzmaßnahmen

Für die Konzeption und Durchführung effektiver Brandschutzmaßnahmen sind unter anderem die folgenden Gesichtspunkte zu berücksichtigen:

- Maßnahmen gegen betriebsbedingte Brand- und Explosionsgefahren
- Rauchverbot
- Feuererlaubnisschein
- Brandschutzorganisation
- Brandschutzordnung
- Brandschutzplan
- Verhalten im Brandfall
- Alarmplan
- Zusammenarbeit mit der Feuerwehr
- Unterrichtung der Betriebsangehörigen
- Schutz gegen Brandstiftung

Detaillierte Informationen können den entsprechenden Richtlinien entnommen werden, insbesondere:

- [VdS 2199](#) Brandschutz im Lager
- [VdS 2000](#) Brandschutz im Betrieb
- [VdS 2001](#) Sicherheitsregeln für die Ausrüstung von Arbeitsstätten mit Feuerlöschern
- [VdS 2030](#) Brandschutzplan, Anleitung und Hilfsmittel für die Erstellung

Speziell für Kunststoff-Recycling-Betriebe sind brandschutztechnische Regelungen zu entnehmen:

- [VdS 2513](#) Brandschutztechnische Richtlinien für die Lagerung von Sekundärrohstoffen aus Kunststoff

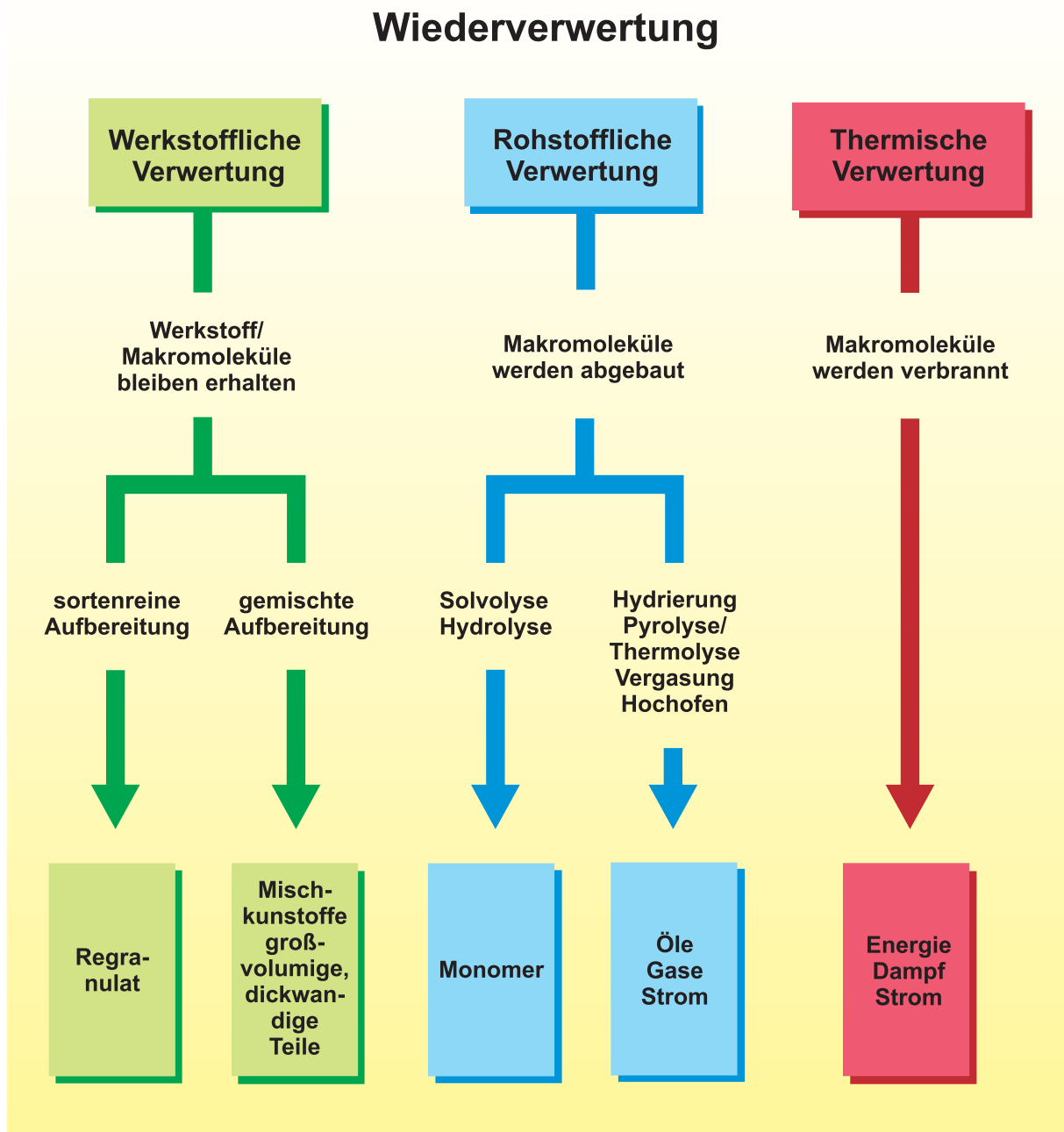


Abbildung 5 : Verwertungsmöglichkeiten für Kunststoffe

- [VdS 2517](#) Sortierung, Aufbereitung und Lagerung von brennbaren Sekundärrohstoffen, Richtlinien für den Brandschutz

5 Auswirkungen beim Brand von Kunststoffen

5.1 Freigesetzte Stoffe bei Kunststoffbränden

Wie bei allen organischen Stoffen entstehen beim Brand von Kunststoffen überwiegend Kohlendioxid, Kohlenmonoxid, Ruß und Wasser (Dampf).

Kunststoffe können - quasi in Umkehrung ihrer Herstellung - depolymerisieren oder pyrolytisch zersetzt werden, so dass neben dem brennbaren Gas Kohlenmonoxid auch andere brennbare Gase entstehen. Darüber hinaus gibt es bei den folgenden Kunststoffen spezifische Zersetzungs- und Brandfolgeprodukte.

Hart-PVC brennt unter Verkohlung mit grün gesäumter Flamme, die nach Entfernen der Zündquelle sofort erlischt. **Weich-PVC** hingegen kann je nach Art und Menge des zugesetzten Weichmachers mit rußender Flamme weiterbrennen.

Hart-PVC ist zwar schwer entflammbar, wird aber beim Brand anderer Stoffe durch Flammen, heiße Brandgase oder Wärmestrahlung zersetzt.

Wird **PVC** auf Temperaturen über 150 °C und darüber hinaus aufgeheizt, werden große Mengen Chlorwasserstoff freigesetzt, die sich mit dem ebenfalls gebildeten Wasserdampf oder mit Löschwasser als Salzsäure niederschlagen bzw. kondensieren oder mit reaktionsfähigen Materialien umsetzen.

Bei höheren Temperaturen oder mit entsprechendem Stützfeuer brennt PVC wie Polyethylen oder Polypropylen. Bei der Verbrennung von PVC entstehen neben Kohlendioxid (CO₂), Wasser (H₂O), Kohlenmonoxid (CO) und Chlorwasserstoff (HCl) auch Spuren von Phosgen (COCl₂). Besonders beim Umgang mit großen Mengen PVC ist daher Folgendes zu beachten.

Bei der thermischen Zersetzung bzw. Verbrennung können, je nach Zusammensetzung des PVC, bis zu ca. 550 Gramm reines HCl-Gas pro Kilogramm PVC entstehen. Dies entspricht unter Normalbedingungen einer Menge von ca. 1,2 Kilogramm handelsüblicher konzentrierter Salzsäure oder ca. 330 Litern HCl-Gas.

Derart korrosive* Brandgase können erhebliche Brandfolgeschäden an Maschinen, Bauwerken und Einrichtungen verursachen, da für die Auslösung des fortschreitend verlaufenden Korrosionsprozesses vielfach katalytische* Mengen Chlorwasserstoff (HCl) ausreichen.

Eine getrennte Lagerung großer Mengen PVC von leicht entflammaren Stoffen reduziert das Risiko der HCl-Freisetzung (siehe Abschnitte 3.3 und 4.1). Ein frühzeitiges Löschen eines Feuers kann die potenziell freiwerdende HCl-Menge wesentlich vermindern.

Polystyrol brennt unter Entwicklung von Ruß mit leuchtend gelber Flamme, die nach Entfernen der Zündquelle selbstständig weiterbrennt.

Duroplaste sind auch bei hohen Temperaturen nicht plastisch verformbar. Sie brennen ohne zu erweichen und zu fließen. Ihre Neigung, gasförmige Zersetzungsprodukte zu bilden, ist gering. Da sie unter Wärmeeinwirkung an der Oberfläche zu verkohlen beginnen, tritt im günstigsten Fall keine Zündung ein.

Im Falle eines Brandes entwickeln sich aus den Kunststoffen **Polyethylen (PE)** und **Polypropylen (PP)** neben Ruß, Kohlendioxid, Kohlenmon-

oxid und Wasser einige niedrigmolekulare Anteile des PE bzw. PP, z.B. Paraffine, Olefine oder zyklische Kohlenwasserstoffe.

Bei der thermischen Zersetzung von fluorhaltigen Kunststoffen, z.B. dem **Polytetrafluorethylen**, wird Fluorwasserstoffgas (HF) freigesetzt. Fluorwasserstoff verbindet sich sehr leicht mit Wasser zu Flusssäure.

Ebenso können beim Brand der mit halogenhaltigen Flammenschutzgeräten versehenen Kunststoffe Halogenwasserstoffe (Bromwasserstoff bzw. Chlorwasserstoff) und andere halogenorganische Verbindungen freigesetzt werden.

Polyurethan depolymerisiert zu Isocyanaten und Alkoholen. Die in der Pyrolysezone entstehenden Polyisocyanate führen zu einer starken Rauchentwicklung.

Darüber hinaus können bei der Verbrennung oder Verschmelzung von organischen Stoffen immer auch geringe Spuren von Aromaten wie z.B. Benzol, Dibenzofuranen und Dibenzodioxinen, sowie polycyclischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK) freigesetzt werden. Wenn am Verbrennungsprozess zusätzlich chlorhaltige Stoffe (z.B. PVC) beteiligt sind, können auch die entsprechenden mono- bis polychlorierten aromatischen Verbindungen wie polychlorierte Dibenzodioxine (PCDD) und polychlorierte Dibenzofurane (PCDF) entstehen.

In der Tabelle 6 ist die mögliche Bildung von toxischen oder umweltgefährdenden Brandfolgeprodukten aus Kunststoffen zusammenfassend wiedergegeben.

Die in Tabelle 6 genannten Kunststoffe können bromhaltige Flammenschutzmittel enthalten, aus denen beim Brand Bromwasserstoff entstehen und sich unter besonderen Bedingungen auch polybromierte Dibenzodioxine/-furane (PBrDD/PBrDF) bilden können.

Eingefärbte Kunststoffe enthalten Pigmente, die häufig Metalloxide beinhalten.

Aus Weichmachern, die in größeren Mengen u.a. in PVC enthalten sein können, sind bei thermischer Einwirkung Phosphor- und Schwefelverbindungen zu erwarten.

5.2 Gefährdungseinschätzung und Schadstoffauswirkungen

Von entscheidender Bedeutung für die gebildete Schadstoffmenge und die daraus resultierende Schadstoffbelastung an der erkalteten Brandstelle sind die Art und Menge des Brandgutes, der Brandverlauf und die Abführung der Rauchgase; diese Kriterien prägen das Brandbild.

Je weniger Hinweise sich für einen Brand unter Sauerstoffmangel (Schwelbrand) finden lassen, umso weniger gravierend müssen die Verdachtsmomente für das Auftreten von Schadstoffen eingeschätzt werden. Ein helles Flammenbild während des Brandes oder die Zerstörung und damit Öffnung von Dächern und Wänden stellen dagegen Hinweise auf eine vollständige Verbrennung mit hohen Temperaturen und damit geringer Wahrscheinlichkeit einer Schadstoffbildung dar.

Auch eine anzunehmende Schadstoffbildung bedeutet jedoch noch keine unmittelbare Gefährdung, sondern es muss zudem eine entsprechende Exposition* und gegebenenfalls ausreichende Bioverfügbarkeit* dieser Schadstoffe gegeben

sein. Unter Bioverfügbarkeit wird die Verfügbarkeit von Schadstoffen für den menschlichen Organismus, hauptsächlich über den Transportweg Blutbahn, verstanden. Auf Brandstellen sind Schadstoffe mit geringem Dampfdruck häufig so stark adsorptiv* an Ruß gebunden, dass eine Aufnahme über die Haut bei einer möglichen Beschmutzung als gering angesehen werden kann.

5.2.1 Kohlendioxid (CO₂)

Entstehung

Bei jeder Verbrennung organischen Materials entsteht das erstickend wirkende Kohlendioxid.

Folgen

Kohlendioxid ist ein Gas, welches außer den gesundheitlichen Risiken (siehe unten) keine direkten Auswirkungen auf Sachwerte oder die Umwelt hat.

Grenz- oder Richtwerte

MAK-Wert: 5000 ml/m³ (ppm), 9000 mg/m³

Gesundheitsrisiken

Kohlendioxid kann zu Schleimhautreizungen, Atemnot, Krämpfen oder auch Atemstillstand führen.

Kunststoff (Kurzzeichen, vgl. Tabelle 1)	CO (toxisch / brennbar), CO ₂ (toxisch)	HCl, HF (korrosiv / toxisch)	HCN (toxisch / brennbar)	PAK (toxisch / brennbar)	PHDD/PHDF (toxisch)	stark rußend
PE	#					
PP	#					
PS	#			(#)		#
PVC (hart u. weich)	#	##		(#)	(#)	
PU	#		##	(#)		
PA	#		##			
PC	#					
PTFE	#	##				
POM	#					
ABS	#		##			#
PETP	#			(#)		
PMMA	#					
PF	#					
UP	#					
SI	#					
Buna	#			(#)		#
Chlorkautschuk	#	##			(#)	

CO = Kohlenmonoxid; CO₂ = Kohlendioxid; HCl = Salzsäure, Chlorwasserstoff; HF = Fluorwasserstoff;
HCN = Blausäure, Cyanwasserstoff; PAK = polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe;
PCDD = polychlorierte Dibenzodioxine; PCDF = polychlorierte Dibenzofurane

(#) Bildung des Schadstoffes in kleinen Mengen möglich

Bildung des Schadstoffes sehr wahrscheinlich

Bildung des Schadstoffes in größeren Mengen zu erwarten

Tabelle 6: Mögliche Bildung von toxischen oder umweltgefährdenden Brandfolgeprodukten aus Kunststoffen (ohne Zuschlagstoffe)

5.2.2 Kohlenmonoxid (CO)

Entstehung

Bei jeder Verbrennung organischen Materials entsteht neben dem erstickend wirkenden Kohlendioxid auch das giftige Kohlenmonoxid (Kohlenstoffmonoxid). Besonders bei unvollständiger Verbrennung und beim Verschwelen ist der Anteil an CO stark erhöht.

Folgen

Kohlenmonoxid ist ein Gas, welches außer den gesundheitlichen Risiken (siehe unten) keine Auswirkungen auf Sachwerte oder die Umwelt hat. In Gegenwart von Kohlenstoff liegt es im Gleichgewicht mit Kohlendioxid (Boudouard-Gleichgewicht) vor.

Grenz- oder Richtwerte

MAK-Wert: 30 ml/m³ (ppm), 33 mg/m³

Gesundheitliche Risiken

Die meisten Todesopfer im Zusammenhang mit Bränden fordert eine akute Vergiftung mit CO. Die tödlichen Konzentrationen von CO betragen 12.500 ppm (1,25 %) in 5 Minuten, 7.600 ppm (0,76 %) in 10 Minuten und 4.600 ppm (0,46 %) innerhalb von 30 Minuten.

5.2.3 Chlorwasserstoff (HCl), Bromwasserstoff (HBr)

Entstehung

Pyrolyse* von halogenorganischen* Verbindungen (z.B. PVC, Kunststoffe mit halogenhaltigen flammhemmenden Zusätzen, Halogenkohlenwasserstoffe).

Folgen

Halogenwasserstoffe und deren Niederschläge können je nach Werkstoff und relativer Luftfeuchtigkeit auf metallischen Oberflächen zur Auslösung eines fortschreitend verlaufenden Korrosionsprozesses führen. Eine zunehmende Reaktionsbeschleunigung erfolgt bei steigender relativer Luftfeuchtigkeit ab etwa 45 %.

Zement- und kalkgebundene Baustoffe reagieren mit Halogenwasserstoffsäure* zum entsprechenden Calciumsalz (Kontaminationsphase). Baufolgeschäden sind nur dann möglich, wenn Halogenide bis zur Stahlarmierung vordringen (Verteilungsphase), wenn dort Feuchtigkeit vorliegt, die Alkalität des Betons abgesunken und die unten aufgeführten Grenzwerte überschritten sind.

Grenz- oder Richtwerte

MAK-Wert* Chlorwasserstoff (HCl):
8 mg/m³ (TRGS 900)

MAK-Wert Bromwasserstoff (HBr):
2 ml/m³ (ppm), 6,7 mg/m³ (TRGS 900)

Korrosiv kritischer Richtwert
bei Metallen:
> 10 µg Halogenid/cm²

Korrosiv kritischer Richtwert
für Stahlbeton:
≥ 0,06 % Cl, bezogen auf Beton

entsprechend:
≥ 0,40 % Cl, bezogen auf Zement

Sanierungsziel:
Unterschreiten dieser Grenzen

Abfallgrenzwert:
Keiner

Gesundheitliche Risiken

HCl- und HBr-Gase reizen Augen und Schleimhäute der Atemwege. Die Halogenwasserstoffniederschläge beinhalten nur ein geringes dermales Gefährdungspotenzial (Hautreizungen).

5.2.4 Cyanwasserstoff / Blausäure (HCN)

Entstehung

Die Verbrennung einer Vielzahl von stickstofforganischen Verbindungen, also auch der entsprechenden Kunststoffe (siehe Tabelle 4), führt neben der Bildung anderer stickstoffhaltiger Schadgase auch zur Freisetzung des sehr giftigen Cyanwasserstoffs.

Folgen

Cyanwasserstoff ist ein Gas, welches außer den gesundheitlichen Risiken (siehe unten) keine Auswirkungen auf Sachwerte oder die Umwelt hat.

Grenz- oder Richtwerte

MAK-Wert: 10 ml/m³ (ppm), 11 mg/m³

Gesundheitliche Risiken

Cyanwasserstoff ist ein nach bitteren Mandeln riechendes sehr giftiges Gas, welches in geringen Konzentrationen sehr schnell zum Tode führt. Die tödlichen Konzentrationen von HCN betragen 570 ppm (0,057 %) in 5 Minuten, 290 ppm (0,029 %) in 10 Minuten und 110 ppm (0,011 %) innerhalb 30 Minuten.

5.2.5 Polycyclische Aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK)

Entstehung

Pyrolyse* und De-Novo-Synthese* jeglichen organischen Materials.

Folgen

Ablagerung als Kondensat auf Oberflächen von Gebäuden und Inventar, wobei die PAK in der Regel adsorptiv* an Ruß- bzw. Brandrückstände gebunden sind.

Grenz- oder Richtwerte

Nach TRGS 905* ist Benzo(a)pyren als Krebs erzeugender, erbgutverändernder, die Fortpflanzungsfähigkeit beeinträchtigender und fruchtschädigender Stoff der Kategorie 2 der Gefahrstoffverordnung (GefStoffV) eingestuft. Zubereitungen und Gemische, die Benzo(a)pyren ab 0,005 Massenprozent enthalten, gelten nach § 35 Abs. 3 GefStoffV und nach TRGS 551* als Krebs erzeugend.

TRK-Wert* (Benzo(a)pyren):
0,002 mg/m³ (TRGS 900)

Sanierungsziel:
< 100 µg/m² Gesamtsumme der 16 Verbindungen nach EPA*-Empfehlung

Abfallgrenzwert:
für Hausmülldeponie 25 - 200 mg/kg
(länderspezifisch)

Gesundheitliche Risiken

Eine Vielzahl der PAK* zählen zu den Krebs erzeugenden bzw. Krebs fördernden Verbindungen mit Benzo(a)pyren als Leitsubstanz.

Eine Gesundheitsgefährdung ist allerdings nur bei einer Langzeiteinwirkung und bei Überschreitung der o.g. Grenzwerte zu befürchten. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass die biologische Verfügbarkeit* wegen der starken adsorptiven* Bindung an Ruß gering ist.

5.2.6 Polyhalogenierte p-Dibenzodioxine (PHDD) und Dibenzofurane (PHDF)*

Entstehung

Pyrolyse* von organischen oder anorganischen Halogenverbindungen in Kombination mit organischem Material (De-Novo-Synthese bei Verbrennungsprozessen).

Es sind 75 Dioxin- und 135 Furankongenere möglich, jeweils mit Chlor- (PCDD/PCDF) bzw. Brom-

substitution (PBDD/PBDF). Werden die möglichen gemischt halogenierten Kongenere* berücksichtigt, so erhöht sich die Zahl auf über 5000.

Folgen

Ablagerung als Kondensat auf Oberflächen von Gebäuden und Inventar. Die PHDD/F* sind in der Regel adsorptiv* an Ruß- bzw. Brandrückstände gebunden.

Grenz- oder Richtwerte

Die Grenz- oder Richtwerte sind auf 2,3,7,8-TCDD* bzw. die in 2,3,7,8-Stellung chlorierten Kongeneren* ausgerichtet.

2,3,7,8-TCDD ist nach TRGS 905* als Krebs erzeugender Stoff der Kategorie 2 nach Anhang I der Gefahrstoffverordnung (GefStoffV) eingestuft. Zubereitungen und Gemische, die 2,3,7,8-TCDD ab 2×10^{-7} Massenprozent enthalten, gelten nach § 35 (3) Verordnung zum Schutz vor gefährlichen Stoffen (Gefahrstoffverordnung - GefStoffV) als Krebs erzeugend.

Nach TRGS 557* und Anhang der TRGS 102 lfd. Nr. 42 TRK gilt für chlorierte Dibenzodioxine und -furane ein Luftgrenzwert von 50 pg TE*/m³ (erfasst nach der Gesamtstaubdefinition). Dieser in der TRGS 557 verankerte Luftgrenzwert findet jedoch keine Anwendung auf Sanierungs- und Abbrucharbeiten sowie unfallartige Ereignisse.

Sanierungsziel bei kontaminierten Oberflächen:
< 50 ng TE/m²

In Räumen für gelegentlichen Aufenthalt:
< 100 ng TE/m²

Abfallgrenzwert:
< 1000 ng/kg TE
(länderspezifisch)

Gesundheitliche Risiken

Einmalig hohe Exposition mit PHDD/F* kann zu Chlorakne führen, wiederholte Aufnahme kleiner Mengen zu chronischer Intoxikation. Letztere kann sich durch die Anreicherung der PHDD/F im Körperfett in Form von Überpigmentierungen, Leberparenchymschädigungen, Störungen des Fettstoffwechsels oder Auslösung von Krebs äußern. Für eine derartige Giftwirkung nach wiederholter Aufnahme über einen längeren Zeitraum (Chronische* Intoxikation) wird derzeit folgender Wert für unbedenklich gehalten:

TDI-Wert* (tolerable daily intake):
1 bis 10 pg TE*/kg Körpergewicht und Tag (nach WHO* und BGA*)

Bei Brandschäden ist zu berücksichtigen, dass die biologische Verfügbarkeit* wegen der starken adsorptiven* Bindung der PHDD/F an Ruß gering ist. Selbst bei Hautkontakt, inhalativer oder oraler Aufnahme von Ruß adsorbierten PHDD/F kann von einer minimalen Resorption ausgegangen werden. Berufstypische Krankheitssymptome sind weder aus dem Bereich der Feuerwehr noch aus dem Kreis der Brandschadensanierungsfirmen bekannt.

Die bromhaltigen Dioxine und Furane werden bezüglich ihrer Toxizität zurzeit den Chlorverbindungen gleichgestellt.

5.2.7 Polychlorierte Biphenyle (PCB)*

Entstehung

Bei Freisetzung oder Verdampfung von Isolierflüssigkeiten aus Kondensatoren, Transformatoren oder Hydraulikflüssigkeiten sowie als Ausgasungsprodukt von Weichmachern aus dauerelastischen Dichtungsmassen und Beschichtungen.

Folgen

Ablagerung als Kondensat auf Oberflächen von Gebäuden und Inventar oder als Flüssigkeitsansammlung mit permanenter Ausgasung in die Raumluft.

Grenz- oder Richtwerte

MAK-Wert*:

0,05 ml/m³ entsprechend 0,5 mg/m³
(nach TRGS 900 bei 54 % Chlor)

0,1 ml/m³ entsprechend 1 mg/m³
(nach TRGS 900 bei 42 % Chlor)

Sanierungsziel:

< 100 µg/m²

Abfallgrenzwert:

für Hausmüllentsorgung 25 - 100 mg/kg
(regional unterschiedlich)

Gesundheitliche Risiken

Die akute Toxizität* (Giftwirkung nach einmaliger oder kurzzeitiger Aufnahme) von reinem PCB* ist gering.

Als kritisch ist die chronische Belastung (wiederholte Aufnahme über einen längeren Zeitraum) durch PCB* mit Auswirkungen auf die Leber anzusehen. Grund ist das hohe Akkumulationsvermögen, die hohe Fettlöslichkeit, die hohe chemische Stabilität und die geringe biologische Abbaubarkeit. Gefahren erhöhend wirken sich die herstellungs- und betriebsbedingten Belastungen von

PCB-Produkten durch Polychlorierte Dibenzofurane aus, die zusätzlich durch chemische Umsetzung beim Brand entstehen.

5.3 Umweltschutzmaßnahmen

Art, Menge und Zusammensetzung der Verbrennungsprodukte hängen entscheidend von Brandgut und den Brandbedingungen ab. Je weniger Hinweise sich für einen Brand unter Sauerstoffmangel (Schwelbrand) finden lassen, umso weniger gravierend müssen die Verdachtsmomente für das Auftreten von Schadstoffen eingeschätzt werden.

Mit der Abkühlung der Brandstelle werden die verbleibenden organischen Schadstoffe*, insbesondere die hoch siedenden Brandfolgeprodukte wie PAK*, PCB* und PHDD / PHDF*, zunehmend adsorptiv* an Ruß gebunden. Gerade die stabile Bindung an Ruß ist dafür verantwortlich, dass die biologische Verfügbarkeit* von im Brandfall gebildeten organischen Schadstoffen nach dem Abkühlen und der vollständigen Deposition stark vermindert ist. Aus diesem Grund besteht bei der kurzzeitigen Begehung der kalten Schadenstelle zum Zweck einer ersten Übersicht grundsätzlich keine Gesundheitsgefährdung.

5.3.1 Löschwasserrückhaltung

Bei der Herstellung und Lagerung von Kunststoffen sind in jedem Fall Vorkehrungen zu treffen, dass anfallendes Löschwasser nicht in offene Gewässer oder das Grundwasser gelangt.

So werden beispielsweise zur Herstellung der Duroplaste je nach gewünschten Stoffeigenschaften u.a. folgende Ausgangsstoffe eingesetzt: Phenol, Formaldehyd, Hexamethylentetramin, Dialkohole (meist C2- bis C4-Diole), ungesättigte Säuren (Fumarsäure, Maleinsäureanhydrid), gesättigte Säuren (Phthalsäure), Styrol, Polyole (Bisphenol A, Novolak), Epichlorhydrin, Harnstoff oder Malein. Alle diese Stoffe sind toxisch für Wasserorganismen und dürfen daher nicht in Boden und Grundwasser oder in offene Gewässer gelangen. Ihre Dämpfe und Stäube wirken auf die Schleimhäute der Augen und Atemwege stark reizend und können zum Teil zu schweren Gesundheitsschäden führen oder sogar tödlich wirken.

Auch bei der Lagerung von größeren Mengen Kunststoffen, die zwar selbst nicht Wasser gefährdend, deren Verbrennungsprodukte aber teilweise Wasser gefährdend sein können, sind Maßnahmen zum Auffangen von kontaminiertem Löschwasser erforderlich (siehe Hinweis auf die brandschutztechnischen Regelungen in Abschnitt 4.1).

Unter dem Begriff Löschwasserrückhaltung sollen alle Maßnahmen verstanden werden, die dazu geeignet sind, das bei einer Brandbekämpfung anfallende Löschwasser am unkontrollierten Abfließen zu hindern.

Eine Orientierungshilfe zur Bemessung von Löschwasser-Rückhalteanlagen geben:

[VdS 2557](#) Richtlinien für Löschwasser-Rückhalteanlagen - Planung und Einbau (in Vorbereitung)

[VdS 2564](#) Richtlinien für Löschwasser-Rückhalteanlagen - Anforderungen und Prüfmethode für Bauteile und Systeme (in Vorbereitung)

Richtlinie zur Bemessung von Löschwasser-Rückhalteanlagen beim Lagern Wasser gefährdender Stoffe (LÖRÜRL)

Löschwasser-Rückhalteanlagen sind offene oder geschlossene Becken, Gruben oder in ihrer Funktion vergleichbare Räume oder Behälter und deren Ausrüstung, die dazu bestimmt und geeignet sind, verunreinigtes Löschwasser bis zum Zeitpunkt der ordnungsgemäßen Entsorgung aufzunehmen. Löschwasser-Rückhalteanlagen müssen ausreichend flüssigkeitsdicht sein und den statischen Belastungen, die auf Grund des aufgestauten Löschwassers auftreten, standhalten. Sie dürfen nur als Auffangraum für die Rückhaltung eventuell auslaufender gelagerter Flüssigkeiten eingesetzt werden, wenn zusätzlich die gesetzlichen Anforderungen an Auffangräume erfüllt sind.

Brandbekämpfungsmaßnahmen dürfen durch Ableiten und Rückhalten des Löschwassers nicht behindert werden. Abfließendes Löschwasser darf beim Ableiten nicht zur Brandausbreitung beitragen. Teile des Kanalnetzes, die für die Löschwasserrückhaltung genutzt werden sowie Abläufe zu zentralen Löschwasser-Rückhalteanlagen, müssen auf dem Betriebsgelände liegen. Das Einbeziehen des öffentlichen Kanalnetzes in die Planung der Löschwasser-Rückhalteanlage ist nicht erlaubt.

Für die Löschwasserrückhaltung sind grundsätzlich bauliche stationäre Lösungen den mobilen Lösungen vorzuziehen. Nur bei nachzurüstenden Lagern sollte in Abhängigkeit von der Größe des Lagers und der Wassergefährdungsklasse der gelagerten Stoffe eine Kombination aus stationärer und mobiler Löschwasserrückhaltung Anwendung finden.

Im konkreten Einzelfall muss geprüft werden, ob

- Brandbekämpfungsmaßnahmen ungehindert durchgeführt werden können,
- der Schutz von Lagergut und Einrichtungen (Maschinen, elektrische und elektronische Geräte usw.) vor Korrosion nicht eine sofortige Reduzierung der Luftfeuchtigkeit erfordert oder
- durch aufgestautes Löschwasser im Lagerbereich nicht Betriebsunterbrechungsschäden zu befürchten sind, die Investitionskosten für eine außerhalb des Lagerbereichs installierte Löschwasser-Rückhalteanlage finanziell übersteigen würden.

Zu den baulichen **stationären** Lösungen gehören z.B.:

- Drainagesystem im Lagerbereich mit Ablauf zu einem eigens errichteten und mit dem Lager im freien Zulauf verbundenen Rückhaltebecken oder Behälter. Becken und Behälter müssen für die Aufnahme des verunreinigten Löschwassers entsprechend dicht und beständig sein. Abhängig von den örtlichen Gegebenheiten kann die Förderung des Löschwassers auch mittels geeigneter Pumpen erfolgen.
- Ausbildung der Grundfläche des Lagers als Auffangraum, z.B. mittels Aufkantung, Schwellen, Rampen evtl. in Verbindung mit Auffangrinnen. Dieser Auffangraum ist so zu bemessen, dass er zusätzlich zu dem gesetzlich vorgeschriebenen Rückhaltevolumen für die Aufnahme eventuell freigesetzter Lagerflüssigkeit, die berechnete Löschwassermenge aufnehmen kann.
- Benutzen von Teilen einer Abwasseranlage, z.B. Absetzbecken oder Ausgleichsbehälter in der betrieblichen Kanalisation, als Auffangvorrichtung. Die Kanalisation und die Rückhaltungsmöglichkeiten müssen der Bauart nach für die zu erwartenden Stoffe im Löschwasser geeignet sein. Die Zuleitungskanäle müssen nachweislich dicht sein. Gegenüber dem weiteren Kanalnetz müssen die Zuleitungen sofort abgetrennt werden können. Dadurch dürfen bei anderen Einleitern in den Kanal keine schädlichen Rückstauwirkungen auftreten. Die Einbindung des öffentlichen Kanalnetzes in die Löschwasserrückhaltung ist nicht zulässig.
- Flüssigkeitsdichte Freilagerflächen und Ladezonen mit Gefälle, die gegen den unkontrollierten Ablauf zum Rand hin durch eine umlaufende Aufkantung gesichert sind; die Entwässerung sollte über eine Sammelgrube mit Notschieber erfolgen.

Zu den **mobilen** Lösungen zählen z.B.:

- Löschwasser-Barrieren (Auslaufsperrern) in Durchfahrten und Durchgängen
- Gully-Abdeckklappen
- Abdeckhauben und Abdichtkissen (mit Wasser oder Sand gefüllt)
- Magnetfolien
- aufblasbare Dichtkissen (z.B. Gully-Ei)
- Spezialfahrzeuge der Feuerwehr mit Tanks, Pumpen und Flüssigkeitssaugern
- mobile Auffangbehälter (Faltbehälter, Container usw.)
- Doppelkammerschläuche als Flüssigkeitssperre

Löschwasser-Barrieren (Auslaufsperrern) dienen der Vermeidung des Auslaufens von verunreinigtem Löschwasser aus Durchfahrten und Durchgängen von baulichen Anlagen. Sie können daher wesentlicher sicherheitstechnischer Bestandteil einer Löschwasser-Rückhalteanlage sein.

In jedem Fall ist für die Wirksamkeit der Rückhalte-systeme sicherzustellen, dass in dem betroffenen Bereich der Untergrund flüssigkeitsdicht ausgebildet ist und kein direkter Bodenablauf in die Kanalisation besteht. Bestimmte wassergefährdende Stoffe machen darüber hinaus spezielle Beschichtungen und Materialien erforderlich.

5.3.2 Entsorgung von Löschwasser

Im Brandfall fällt in der Regel Löschwasser an, das durch Löschmittel, Brandgut oder andere Stoffe verunreinigt ist. Ist das zurückgehaltene Löschwasser durch Wasser gefährdende Stoffe verunreinigt, ist mit den Betreibern der Kläranlagen und den zuständigen Behörden vorsorglich ein Konzept für die Löschwasserentsorgung festzulegen. Vor jeder Löschwassereinleitung ist eine Rücksprache mit den Betreibern der Kläranlage notwendig, insbesondere dann, wenn Sonderlöschmittel oder Schaumzusätze benutzt worden sind.

5.3.3 Brandrückstände

Es empfiehlt sich, schon bei den Abbruch- und Aufräumarbeiten auf eine getrennte Erfassung der Brandrückstände zu achten. Die Entsorgung definierter separierter Abfälle ist nicht nur weniger problematisch, sondern die Rückstände können zugleich auch unter Gewinnung von Wertstoffen, Aussortierung recyclingfähiger Materialien, Trennung der Reststoffe mit Minimierung der möglicherweise als Sonderabfall zu entsorgender Brandrückstände rasch beseitigt werden.

Brandrückstände lassen sich grob unterteilen in:

- Bauschutt (Bauteile, Abbruch usw.)
- Brandschutt (Tapeten, Teppiche, Mobiliar, Textilien elektrische Geräte usw.)
- abgebrannte bzw. verkohlte Kunststoffteile
- Rückstände aus den Reinigungsmaßnahmen
- asbesthaltige Rückstände

In jedem Fall ist es zu vermeiden, dass Verschmutzungen aus den kontaminierten in nicht kontaminierte Bereiche verschleppt werden.

Weiter gehende Hinweise zur Sanierung und Entsorgung sind beispielsweise den Empfehlungen des Bundesgesundheitsamtes (Bundesgesundheitsblatt 1/90, Empfehlungen zur Reinigung von Gebäuden nach Bränden) oder den Richtlinien zur Brandschadensanierung ([VdS 2357](#)) des Gesamtverbandes der Deutschen Versicherungswirtschaft (GDV) zu entnehmen.

Brandrückstände sind in Absprache mit den Aufsichtsbehörden nach Maßgabe der für die Entsorgung von Hausmüll/Sperrmüll geltenden landesrechtlichen Vorschriften zu sammeln und zu entsorgen.

5.3.4 Brandgase

Bei Bränden entstehen aus allen organischen Materialien wie z.B. Holz, Wolle oder Kunststoffen mit dem Sauerstoff der Luft Brandgase. Diese können, unabhängig davon, ob es sich um Naturstoffe oder Kunststoffe handelt, grundsätzlich toxische, die Umwelt oder Wasser gefährdende Substanzen enthalten.

Die Verdünnung der Brandgase tritt nach grober Abschätzung mit der dritten Potenz der Entfernung ein. Nach dieser Schätzung beträgt die Konzentration in 100 m nur noch 1/1000 und nach 1000 m lediglich 1/1000000 der Anfangskonzentration. So betragen bei Waldbränden die Kohlendioxid-Konzentrationen in der Nähe des Feuers in der Regel 200 ppm und sinken in 30 m Entfernung auf unter 10 ppm ab. Die potenzielle akute Gefährdung der weiteren Umgebung durch Brandgase ist demnach eher als gering einzustufen.

Bei einem Brand sind Fenster und Türen zu schließen, Klimaanlage abzuschalten und im weiteren den Anordnungen der Einsatzleitung (Feuerwehr oder Polizei) Folge zu leisten. Sie entscheidet beispielsweise, ob eine Räumung der benachbarten Gebäude notwendig ist.

6 Glossar

Abbrandgeschwindigkeit: Unter festgelegten Prüfbedingungen in einer Zeiteinheit verbrannte Fläche oder Länge eines Materials (nach DIN 50060).

Additiv: Zuschlagstoff für Kunststoffe, um Eigenschaften und Aussehen zu verändern.

Adsorption/adsorptiv: Anreicherung eines Stoffes an der Oberfläche eines Festkörpers durch Molekularkräfte (Adhäsion). Eine besonders starke Adsorptionswirkung zeigen fein verteilte und poröse Stoffe, wie Ruß und Feinstaub, wegen ihrer großen inneren Oberfläche (z.B. Aktivkohle bis zu 500 m²/g).

Aromaten: Unter Aromaten wird die Klasse der aromatischen Verbindungen verstanden, deren bekanntester Vertreter Benzol samt seinen Abkömmlingen und Kondensationsprodukten ist. Das gemeinsame Bauprinzip der Moleküle sind planare Ringsysteme mit nicht lokalisierten Doppelbindungen.

Akute und chronische Toxizität: siehe Toxizität.

BGA: Bundesgesundheitsamt; die Aufgaben des BGA werden seit 1996 vom Umweltbundesamt (UBA) wahrgenommen.

Biologische Verfügbarkeit (Bioverfügbarkeit): Darunter wird die Verfügbarkeit von Schadstoffen für den menschlichen Organismus über die Blutbahn verstanden. Damit diese überhaupt eine Wirkung entfalten können, müssen die Schadstoffe entweder in einer verfügbaren Form aufgenommen oder im Körper entsprechend freigesetzt werden. Für Schadstoffe aus Brandschäden bedeutet dies, dass deren biologische Verfügbarkeit wegen der starken adsorptiven Bindung an Ruß in der Regel gering ist.

Brandlast: Summe der Wärmeenergien, die bei Verbrennung aller brennbaren Stoffe in einem Bereich frei werden können (nach DIN 50060); wird oft auch auf die Fläche des Bereiches bezogen und in MJ/m² angegeben.

De-Novo-Synthese: Reaktionen von in der Flammenhitze erzeugten Radikalen unter Bildung neuer Verbindungen.

Depolymerisation: Zerfall von langkettigen Molekülen (Polymeren) in kürzere Bruchstücke, z.B. durch Verbrennung.

Duroplast: Engmaschig vernetzter Kunststoff; durch Erwärmung nicht plastisch verformbar (vgl. Tabelle 2).

endotherme Prozesse: Chemische Reaktionen, die unter Wärmeaufnahme aus der Umgebung ablaufen.

Elastomer: Weitmaschig vernetzter Kunststoff mit elastischen Eigenschaften (vgl. Tabelle 2).

Entflammbarkeit: Eigenschaft eines Materials oder Produkts, unter festgelegten Prüfbedingungen mit Flammenbildung brennen zu können (nach DIN 50060).

Entflammungstemperatur: Niedrigste Temperatur eines Materials, bei der unter festgelegten Prüfbedingungen die sich bildenden brennbaren Gase mit einer Zündquelle entzündet werden können (vgl. Tabelle 4).

Entzündungstemperatur: Niedrigste Temperatur eines Materials, bei der unter festgelegten Prüfbedingungen eine anhaltende Verbrennung eingeleitet werden kann; wird auch als Zündtemperatur bezeichnet.

EPA: Environmental Protection Agency (Umweltbehörde der USA).

Erweichungstemperatur: Temperatur, bei der Polymere vom glasigen oder hartelastischen in einen gummielastischen Zustand übergehen.

Exposition: Ein Organismus ist Schadstoffen ausgesetzt und es besteht die Möglichkeit, dass diese über die Haut, die Atemwege oder durch Verschlucken aufgenommen werden.

Flash over: Schlagartiges Übergreifen eines Brandes auf die Oberfläche aller brennbaren Stoffe in einem geschlossenen Raum (nach DIN 50060); auch Feuerübersprung genannt.

GDV: Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V.

Gefahrstoffe / Schadstoffe: Gefahrstoffe sind gemäß § 3 Abs. 1 GefStoffV die in § 19 Abs. 2 ChemG (Chemikaliengesetz) bezeichneten Stoffe, Zubereitungen und Erzeugnisse, nämlich

- gefährliche Stoffe und Zubereitungen nach § 3a sowie Stoffe und Zubereitungen, die sonstige chronisch schädigende Eigenschaften besitzen,
- Stoffe, Zubereitungen und Erzeugnisse, die explosionsfähig sind,

- Stoffe, Zubereitungen und Erzeugnisse, aus denen bei der Herstellung oder Verwendung Stoffe oder Zubereitungen nach Nummer 1 oder 2 entstehen oder freigesetzt werden können,
- Stoffe, Zubereitungen und Erzeugnisse, die erfahrungsgemäß Krankheitserreger übertragen können.

Schadstoffe im Sinne der Richtlinien [VdS 2357](#) können über o.g. Definition "Gefahrstoffe" hinaus Stoffe oder Stoffgemische (Reinstoff, Produkt, Erzeugnis, Rückstand, Reststoff, Abfall) sein, die bei Eintrag in Ökosysteme oder Aufnahme durch lebende Organismen oder an Sachgütern nachteilige Veränderungen hervorrufen können.

GefStoffV: Verordnung zum Schutz vor gefährlichen Stoffen (Gefahrstoffverordnung - GefStoffV). Zweck der GefStoffV ist es, durch Regelungen über die Einstufung, über die Kennzeichnung und Verpackung von gefährlichen Stoffen, Zubereitungen und bestimmten Erzeugnissen sowie über den Umgang mit Gefahrstoffen den Menschen vor arbeitsbedingten und sonstigen Gesundheitsgefahren und die Umwelt vor stoffbedingten Schädigungen zu schützen, insbesondere sie erkennbar zu machen, sie abzuwenden und ihrer Entstehung vorzubeugen.

Halogene/halogenorganische Verbindungen: Als Halogene (griech.: Salzbildner) bezeichnet man die chemischen Elemente Fluor, Chlor, Brom, Iod und Astat. Folglich versteht man unter halogenorganischen Verbindungen Kohlenstoffverbindungen, die neben funktionellen Gruppen wie Alkohol-, Aldehyd- oder Ketongruppen auch Halogene wie Chlor und Brom enthalten (z.B. Chlorkohlenwasserstoffe, Pentachlorphenol (PCP), Brombenzol).

Heizwert: Wärmemenge, die bei der vollständigen Verbrennung eines Materials frei wird, wobei sich das bildende Wasser im dampfförmigen Zustand befindet.

Hydrierung: Bezeichnung für die normalerweise katalytisch ablaufende Einführung von Wasserstoff in organische Verbindungen.

Katalysatoren/katalytisch: Stoffe, die die Aktivierungsenergie zum Ablauf einer bestimmten Reaktion herabsetzen und dadurch die Reaktionsgeschwindigkeit erhöhen, ohne im Endprodukt der Reaktion zu erscheinen.

KLT: Kleinladungsträger; in der Industrie häufig anzutreffende Lager- und Transportbehälter aus PE und PP.

Kongenerere: Unter Kongeneren wird die Vielzahl von Einzelsubstanzen eines in Anzahl und Stellung unterschiedlich substituierten Grundkörpers, z.B. des p-Dibenzodioxins oder Dibenzofurans, verstanden. Bei gleicher Anzahl, aber verschiedener Stellung der Substituenten handelt es sich um Isomere.

Kontamination: Der Begriff stammt aus der Medizin und bedeutet Verseuchung mit schädlichen, insbesondere radioaktiven Stoffen. Teilweise wird auch heute noch umgangssprachlich von "verseuchtem" an Stelle von schadstoffbelastetem Boden, Wasser usw. gesprochen. Um die durch Mikroorganismen hervorgerufenen Seuchen eindeutig von einer "Schadstoffbelastung" abzugrenzen, sollte letztere ausschließlich als Kontamination bezeichnet werden.

Konzentrationsangaben: Im Zusammenhang mit Brandschäden sind grundsätzlich drei Arten von Konzentrationsangaben möglich. Die in einer entnommenen Probe enthaltene Schadstoffmenge kann entweder auf

- das Gewicht der Probenmenge,
- die Fläche, von der sie abgewischt wurde, oder
- das angesaugte Luftvolumen

bezogen werden.

Übliche gewichts- bzw. massebezogene Konzentrationseinheiten sind:

$$1 \text{ ppm (part per million)} = 1 \text{ mg/kg} \\ = 10^{-3} \text{ g/kg (m=milli)}$$

$$1 \text{ ppb (part per billion)} = 1 \text{ } \mu\text{g/kg} \\ = 10^{-6} \text{ g/kg (\mu=mikro)}$$

$$1 \text{ ppt (part per trillion)} = 1 \text{ ng/kg} \\ = 10^{-9} \text{ g/kg (n=nano)}$$

$$1 \text{ ppq (part per quadrillion)} = 1 \text{ pg/kg} \\ = 10^{-12} \text{ g/kg (p=piko)}$$

Übliche oberflächenbezogene Konzentrationsangabe: ng/m^2

Übliche volumenbezogene Konzentrationsangabe: pg/m^3 bzw. ng/m^3

korrosiv: Ein angreifender Stoff, der chem. oder elektrochem. wirkt und zur Materialzerstörung durch Korrosion (lat.: zernagen) führt, wird als korrosives Mittel oder Angriffsmittel bezeichnet.

LCKW: Leicht verdampfbare Chlorierte Kohlenwasserstoffe

Löschwasserrückhaltung: Maßnahmen zur Verhinderung von unkontrolliertem Abfließen von bei der Brandbekämpfung anfallendem Löschwasser.

MAK: Der MAK-Wert (maximale Arbeitsplatz-Konzentration) gibt die höchstzulässige Konzentration eines Stoffes in der Luft am Arbeitsplatz an, die auch bei langfristiger Exposition (8 Stunden täglich, 40 Stunden wöchentlich) die Gesundheit nicht beeinträchtigt. Er wird von einer Kommission begründet und in einer Technischen Regel veröffentlicht.

NATO/CCMS: North Atlantic Treaty Organization/Committee of the Challenges of Modern Society (Nord-Atlantik-Pakt/Komitee "Herausforderungen der modernen Gesellschaft")

PAK - Polycyclische Aromatische Kohlenwasserstoffe: Sie entstehen bei unvollständiger Verbrennung organischen Materials. Einige Substanzen dieser Stoffklasse gelten als Krebs erzeugende Schadstoffe, wobei das Benzo(a)pyren als Leitsubstanz dient.

PCB - Polychlorierte Biphenyle: PCB fanden auf Grund ihrer Eigenschaften (u. a. Unbrennbarkeit, thermische Stabilität, chemische Resistenz) früher einen breiten Anwendungsbereich, z.B. als Isolier- und Kühlmittel oder Hydraulikflüssigkeiten. Da PCB herstellungsbedingt unterschiedlich hohe Mengen an PCDD/PCDF* enthalten, wurde ihre Herstellung eingestellt (Verordnung über Verbote und Beschränkungen des Inverkehrbringens gefährlicher Stoffe, Zubereitungen und Erzeugnisse nach dem Chemikaliengesetz, Chemikalien-Verbotsverordnung - ChemVerbotsV). Bei der thermischen Belastung von PCB im Temperaturbereich von 600 bis 900 °C können wie im Brandfall zusätzlich Dioxine und Furane gebildet werden.

PCP - Pentachlorphenol: PCP wurde lange Zeit als wirksames Holzschutzmittel eingesetzt. Seit 1989 sind allerdings Herstellung, Vertrieb und Verwendung verboten (Verordnung über Verbote und Beschränkungen des Inverkehrbringens gefährlicher Stoffe, Zubereitungen und Erzeugnisse nach dem Chemikaliengesetz, Chemikalien-Verbotsverordnung - ChemVerbotsV).

Petrochemie: Chemie der Erdölprodukte.

PHDD/PHDF - Polyhalogenierte p-Dibenzodioxine und Dibenzofurane: Der Begriff "Dioxine" steht synonym für die 75 chlorierten p-Dibenzod-

ioxine (PCDD) und im erweiterten Sinne auch für die 135 Dibenzofurane (PCDF); die gleiche Kongenerenzahl analoger Bromverbindungen (PBDD/PBDF) ist möglich. Unter Berücksichtigung aller gemischthalogениerten Dioxine und Furane (PHDD/PHDF = PHDD/F) handelt es sich um einige Tausend Einzelverbindungen.

phlegmatisierende Füllstoffe: Zusatzstoffe, welche die Empfindlichkeit gegenüber Umwelteinwirkungen herabsetzen.

Polymer: Substanz, die aus Molekülen besteht, in denen eine oder mehrere Arten von Atomen oder Atomgruppierungen wiederholt aneinander gereiht sind.

Pyrolyse- (und Crackvorgänge): Als Pyrolyse wird die thermische Zerlegung/Zerstörung von Molekülverbindungen in organischen Stoffen unter Sauerstoffmangel verstanden. Wird die Pyrolyse in einem technischen Verfahren gezielt durchgeführt (z.B. Benzinherstellung), so wird in der Regel von Crackprozessen gesprochen.

Schadstoffe: siehe Gefahrstoffe.

TCDD: Das 2,3,7,8-Tetrachlor-p-dibenzodioxin (2,3,7,8-TCDD) stellt den bekanntesten und toxischsten Vertreter aus der Gruppe der PHDD/PHDF* dar.

TDI-Wert: Der TDI-Wert (tolerable daily intake = duldbare tägliche Aufnahme) gibt für nicht willentlich in die Umwelt eingebrachte Stoffe die tägliche Höchstdosis an, die auch bei lebenslanger Aufnahme ohne gesundheitlichen Einfluss bleibt.

Thermoplast: Kunststoff mit linearem und verzweigtem Aufbau; durch Erwärmung erweich- und bearbeitbar (siehe Tabelle 2).

TE (Toxizitätsäquivalente): Die akute und chronische Toxizität der Vielzahl an Einzelverbindungen, die meist zusammenfassend als "Dioxine" bezeichnet werden, ist sehr unterschiedlich und kann bis zu einem Faktor von 10 000 variieren. Zur Abschätzung der Toxizität* von Kongenerengemischen polychlorierter Dibenzodioxine und -furane wurden Toxizitätsäquivalenzfaktoren (TEF) eingeführt, wobei dem 2,3,7,8-TCDD* als Vertreter mit der höchsten Giftigkeit ein TEF von 1 zugeordnet wurde. Für die toxikologisch wichtigsten Kongeneren*, die mindestens in 2,3,7,8-Stellung mit Chlor substituiert sind, wurde die relative Wirkungsintensität im Vergleich zu 2,3,7,8-TCDD* ermittelt und entsprechende TEF festgelegt.

Die Toxizität eines Gemisches kann somit grob abgeschätzt werden, indem die Konzentration der einzelnen Kongenere mit dem zugehörigen TEF multipliziert und anschließend die Summe gebildet wird. Das Ergebnis in Toxizitätsäquivalenten (TE) stellt dann angenähert das Risikopotenzial dar:

$$\sum TE_i = \sum \text{Konz}_i \times \text{TEF}_i$$

Leider haben sich unterschiedliche Bewertungen entwickelt, so dass es Toxizitätsäquivalenzfaktoren nach BGA*, EPA*, NATO/CCMS* und anderen Organisationen gibt. In Deutschland sollten möglichst nur die TE nach BGA* oder die internationalen TE (I-TE) Anwendung finden.

Toxizität: Giftigkeit eines Stoffes; man unterscheidet zwischen akuter Toxizität (Giftwirkung nach einmaliger oder kurzzeitiger Aufnahme) und chronischer Toxizität (Giftwirkung nach wiederholter Aufnahme während längerer Zeit), wobei auf der kalten Brandstelle die Bedeutung der chronischen Toxizität überwiegt.

TRGS: Technische Regeln für Gefahrstoffe (TRGS) geben den Stand der sicherheitstechnischen, arbeitsmedizinischen, hygienischen sowie arbeitswissenschaftlichen Anforderungen an Gefahrstoffe hinsichtlich Inverkehrbringen und Umgang wieder. Sie werden vom Ausschuss für Gefahrstoffe (AGS) aufgestellt und von ihm der Entwicklung entsprechend angepasst. Die TRGS werden vom Bundesminister für Arbeit und Sozialordnung im Bundesarbeitsblatt bekannt gegeben.

TRK: Technische Richtkonzentration; für eine Reihe Krebs erzeugender und erbgutverändernder Arbeitsstoffe können keine MAK-Werte* ermittelt werden. Die Gründe dafür liegen darin, dass sich Krebs erst nach Jahren und unter Umständen erst in künftigen Generationen manifestiert. Absolute Wirkungsgrenzkonzentrationen lassen sich in Tierversuchen grundsätzlich nicht ermitteln und auf den Menschen übertragen. Da bestimmte Krebs erzeugende Stoffe technisch unvermeidbar sind und Expositionen gegenüber diesen Stoffen nicht ausgeschlossen werden können, ist es notwendig, hierfür Richtwerte (die Technische Richtkonzentrationen, TRK) zu schaffen, um die notwendigen Arbeitsschutzmaßnahmen treffen zu können.

Verbrennungswärme: Wärmemenge, die bei der Verbrennung eines Materials unter bestimmten Prüfbedingungen frei wird.

Verwertung: Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz: Das "Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirt-

schaft und Sicherung der umweltverträglichen Beseitigung von Abfällen (KrW/AbfG)" hat die Förderung der Kreislaufwirtschaft zur Schonung der natürlichen Ressourcen und die Sicherung der umweltverträglichen Beseitigung von Abfällen zum Ziel. Es unterscheidet zwischen "Abfällen zur Verwertung" und "Abfällen zur Beseitigung".

Gemäß der Auflistung in den verschiedenen Bestimmungsverordnungen (Bestimmungsverordnung besonders überwachungsbedürftige Abfälle, BestbÜAbfV; Bestimmungsverordnung überwachungsbedürftige Abfälle zur Verwertung, BestüVAbfV) unterliegt die Entsorgung dieser Abfälle unterschiedlichen Nachweisverfahren. Die Durchführung der Verfahren wird in der Nachweisverordnung, NachwV, geregelt.

Gewerbliche Erzeuger von "Abfällen zur Verwertung" unterliegen keiner Überlassungspflicht gegenüber den öffentlich-rechtlichen Entsorgungsträgern.

Die thermische Verwertung ist bei Einhaltung definierter Kenngrößen abfallwirtschaftlich der stofflichen Verwertung gleichzusetzen.

VKE: Verband der Kunststoff erzeugenden Industrie e.V.

Wasser gefährdende Stoffe: Substanzen, die geeignet sind, Gewässer zu verunreinigen oder sonst in ihren Eigenschaften nachteilig zu verändern. Wasser gefährdende Stoffe werden von der Bundesregierung durch Rechtsverordnung mit Zustimmung des Bundesrates bestimmt. Die Stoffe sind in vier Wassergefährdungsklassen (WGK) eingeteilt. Noch nicht im Katalog aufgenommene Stoffe sind vorsorglich als Wasser gefährdende anzusehen, solange über die Einstufung noch nicht entschieden ist. Die Wasser gefährdenden Stoffe sind festgelegt in der Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zum Wasserhaushaltsgesetz über die Einstufung Wasser gefährdender Stoffe in Wassergefährdungsklassen (Verwaltungsvorschrift Wasser gefährdende Stoffe - VwVwS).

WHO: World Health Organization (Weltgesundheitsorganisation der UNO).

7 Literatur

Allgemeine Literatur

Roth, Lutz: Chemie-Brände und Vorsorgemaßnahmen; Ecomed Verlagsgesellschaft mbH, Landsberg/Lech, 1998

Isterling, Fritz (Hg.): Handbuch Betrieblicher Brandschutz; Kriminalistik Verlag, Heidelberg, 1988

Troitzsch, Jürgen: International Plastics Flammability Handbook, Principles-Regulations, Testing and Approval; Carl Hanser Verlag, München, Wien, New York, 1990

Carlowitz, Bodo: Kunststofftabellen; Schiffmann Tabellenverlag, Bensberg, 1973

Kunststoffe, Werkstoffe unserer Zeit; Arbeitsgemeinschaft Deutsche Kunststoffindustrie, Frankfurt a.M., 1989

Saechting, Hansjürgen: Kunststoff Taschenbuch; Carl Hanser Verlag. München, Wien, 1983

Falbe, Jürgen (Hg.): Römpf Chemie Lexikon; Georg Thieme Verlag, Stuttgart, New York, 1992

Gesetze, Verordnungen, behördliche Richtlinien und Empfehlungen

Empfehlungen zur Reinigung von Gebäuden nach Bränden; Bekanntmachung des Bundesgesundheitsamtes, veröffentlicht in: Bundesgesundheitsblatt 1/90, S. 32, 1990

Umweltbundesamt, Pressestelle,
Postfach 33 00 22, 14191 Berlin
Internet: www.umweltbundesamt.de

Muster einer Richtlinie zur Bemessung von Löschwasser-Rückhalteanlagen beim Lagern Wasser gefährdender Stoffe (LÖRüRL)

Verlag Ernst & Sohn, Böhrlingstraße 10, 13086 Berlin
Internet: www.wiley-vch.de/ernst+sohn/index.html

Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Wasserhaushaltsgesetz über die Einstufung Wasser gefährdender Stoffe in Wassergefährdungsklassen (Verwaltungsvorschrift Wasser gefährdende Stoffe - VwVwS)

Gesetz zur Vermeidung, Verwertung und Beseitigung von Abfällen; Artikel 1 Gesetz zur Förderung

der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Beseitigung von Abfällen (Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz - KrW-/A Gesetz zum Schutz vor gefährlichen Stoffen (Chemikaliengesetz - ChemG)

Verordnung über Verbote und Beschränkungen des Inverkehrbringens gefährlicher Stoffe, Zubereitungen und Erzeugnisse nach dem Chemikaliengesetz (Chemikalien-Verbotsverordnung - ChemVerbotsV)

Verordnung über Verwertungs- und Beseitigungsnachweise (Nachweisverordnung - NachwV)

Verordnung zum Schutz vor gefährlichen Stoffen (Gefahrstoffverordnung - GefStoffV)

Verordnung zur Bestimmung von besonders überwachungsbedürftigen Abfällen (Bestimmungsverordnung besonders überwachungsbedürftige Abfälle - BestbÜAbfV)

Verordnung zur Bestimmung von überwachungsbedürftigen Abfällen zur Verwertung (Bestimmungsverordnung überwachungsbedürftige Abfälle zur Verwertung - BestÜVAbfV)

Bundesanzeiger Verlagsgesellschaft mbH,
Postfach 13 20, 53003 Bonn
Internet: www.bundesanzeiger.de

Normen

DIN 4102-1 Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen; Baustoffe, Begriffe, Anforderungen und Prüfungen

DIN 50060 Prüfung des Brandverhaltens von Werkstoffen und Erzeugnissen, Begriffe

Beuth Verlag GmbH, 10722 Berlin
Internet: www.beuth.de

Technische Regeln

Technische Regeln für Gefahrstoffe

TRGS 102 Technische Richtkonzentrationen (TRK) für gefährliche Stoffe

TRGS 514 Lagern sehr giftiger und giftiger Stoffe in Verpackungen und ortsbeweglichen Behältern

TRGS 515 Lagern brandfördernder Stoffe in Verpackungen und ortsbeweglichen Behältern

TRGS 551 Teer und andere Pyrolyseprodukte aus organischem Material

TRGS 557 Dioxine (polyhalogenierte Dibenzo-p-Dioxine und Dibenzo-Furane)

TRGS 900 Grenzwerte in der Luft am Arbeitsplatz "Luftgrenzwerte - MAK- und TRK- Werte"

TRGS 905 Verzeichnis Krebs erzeugender, erbgutverändernder oder fortpflanzungsgefährdender Stoffe

Technische Regeln Druckgase

TRG 280 Allgemeine Anforderungen an Druckgasbehälter; Betreiben von Druckgasbehältern

Technische Regeln für brennbare Flüssigkeiten

TRbF 110 Läger

TRbF 210 Läger

Verlag W. Kohlhammer GmbH,
Heßbrühlstraße 69, 70565 Stuttgart

VdS-Publikationen

[VdS 2000](#) Brandschutz im Betrieb

[VdS 2001](#) Sicherheitsregeln für die Ausrüstung von Arbeitsstätten mit Feuerlöschern

[VdS 2030](#) Brandschutzplan, Anleitung und Hilfsmittel für die Erstellung

[VdS 2199](#) Brandschutz im Lager

[VdS 2357](#) Richtlinien zur Brandschadensanierung

[VdS 2513](#) Brandschutztechnische Richtlinien für die Lagerung von Sekundärrohstoffen aus Kunststoff

[VdS 2517](#) Sortierung, Aufbereitung und Lagerung von brennbaren Sekundärrohstoffen, Richtlinien für den Brandschutz

[VdS 2557](#) Richtlinien für Löschwasser-Rückhalteanlagen, Planung und Einbau (in Vorbereitung)

[VdS 2564](#) Richtlinien für Löschwasser-Rückhalteanlagen - Anforderungen und Prüfmethode für Bauteile und Systeme (in Vorbereitung)

VdS Schadenverhütung, Verlag,
Amsterdamer Straße 174, 50735 Köln
Internet: www.vds.de

Herausgeber: Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V. (GDV)

Verlag: VdS Schadenverhütung GmbH • Amsterdamer Str. 174 • D-50735 Köln
Telefon: (0221) 77 66 - 0 • Fax: (0221) 77 66 - 341

Copyright by VdS Schadenverhütung GmbH. Alle Rechte vorbehalten.