

Institut für Werkstoffe des Bauwesens
Fakultät für
Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften

Bauchemie und Werkstoffe des Bauwesens

Chemie organischer Baustoffe - Kunststoffe -

Univ.-Prof. Dr.-Ing. K.-Ch. Thienel

Dr. rer. nat. M. Köberl

Wintertrimester 2026

Inhaltsverzeichnis

	1
1 Chemie der organischen Baustoffe	7
1.1 Allgemeines	7
1.2 Kohlenwasserstoffe	7
1.2.1 Alkane (Paraffine)	8
1.2.2 Alkene (Olefine)	8
1.2.3 Alkine (Ethine)	9
1.2.4 Aromatische Kohlenwasserstoffe, Arene	10
1.3 Oxidationsprodukte der Kohlenwasserstoffe	10
1.3.1 Allgemeine Ableitung der aliphatischen Oxidationsprodukte	10
1.3.2 Alkohole, Alkanole, Hydroxylgruppe [Lit 2]	11
1.3.3 Ether, Äther [Lit 2]	11
1.3.4 Carbonsäuren [Lit 2]	11
1.3.5 Alkanale, Aldehyde, Aldehydgruppe [Lit 2]	12
1.3.6 Ketone [Lit 2]	12
1.3.7 Ester [Lit 2]	13
2 Einführung in die Kunststoffe [Lit 8]	14
2.1 Allgemeines	14
2.2 Begriffe	15
2.3 Allgemeine technische Merkmale	16
3 Aufbau der Kunststoffe	18
3.1 Bildungsmechanismen	18
3.1.1 Polymerisation	18
3.1.2 Polykondensation	18
3.1.3 Polyaddition	19
3.2 Molekularstruktur und Bindungskräfte [Lit 8]	21

3.3	Zustandsbereiche	21
3.3.1	Glaszustand	21
3.3.2	Übergangsbereich (Glasübergang)	22
3.3.3	Gummielastizität	22
3.3.4	Viskoses Fließen	22
3.4	Einteilung der Kunststoffe nach Struktur und temperaturabhängigem Verhalten	23
3.4.1	Thermoplaste	23
3.4.2	Duroplaste	24
3.4.3	Elastomere	25
3.4.4	Thermoplastische Elastomere	25
3.5	Einteilung von Kunststoffen nach Funktionen	25
3.6	Weitere Einflüsse auf das Verhalten der Kunststoffe	28
4	Verarbeitung und Lieferformen	29
4.1	Hilfs- und Zusatzstoffe	29
4.1.1	Weichmacher	29
4.1.2	Lösungsmittel	29
4.1.3	Farbstoffe	29
4.1.4	Antistatika	29
4.1.5	Stabilisatoren [Lit 9]	29
4.1.6	Flammschutzmittel [Lit 9]	30
4.1.7	Füllstoffe [Lit 9]	30
4.1.8	Treibmittel [Lit 9]	30
4.2	Herstellvorgang	30
4.2.1	Thermoplaste	30
4.2.2	Duroplaste	31
4.2.3	Elastomere	31
4.3	Besondere Lieferformen	32

5	Kunststoffe im Bauwesen [Lit 8]	33
5.1	Thermoplaste	34
5.1.1	Polyethylen (PE)	34
5.1.2	Polypropylen (PP)	34
5.1.3	Polyisobutylen (PIB)	34
5.1.4	Polyvinylchlorid (PVC)	34
5.1.5	Polymethylmethacrylat (PMMA)	35
5.1.6	Polyvinylacetat (PVAC)	35
5.1.7	Polystyrol (PS)	35
5.1.8	Polytetrafluorethylen (PTFE) (z. B. Teflon)	35
5.1.9	Polyamide (PA) (z. B. Nylon)	35
5.1.10	Polycarbonat (PC)	36
5.1.11	Polyurethane (PUR)	36
5.1.12	Polyester	36
5.2	Duroplaste	36
5.2.1	Ungesättigte Polyesterharze (UP)	36
5.2.2	Methacrylharze (MMA)	36
5.2.3	Epoxidharze (EP)	36
5.2.4	Polyurethanharz (PUR)	36
5.2.5	Aminoplaste (UF/MF)	37
5.2.6	Phenolharze (PF)	37
5.3	Elastomere	37
5.3.1	Chloroprenkautschuk (CR)	37
5.3.2	Ethylen - Propylen (-Dien-) - Terpolymer-Kautschuk (EPDM)	37
5.3.3	Siliconkautschuk (SIR)	37
5.3.4	Polyurethan (PUR)	37
5.3.5	Polysulfid	37

6	Eigenschaften und Prüfung von Kunststoffen	38
6.1	Einfluss von Belastungsgeschwindigkeit und Temperatur auf das Kurzzeitverhalten	38
6.2	Rheologisches Verhalten	40
6.2.1	Kurzzeitverhalten	40
6.2.2	Langzeitverhalten	41
6.2.3	Dauerschwingverhalten	43
6.3	Wasseraufnahme/Chemikalienbeständigkeit	44
6.4	Alterungsverhalten	45
6.5	Brandverhalten	46
6.6	Prüfung von Reaktionsharzen	46
6.7	Identitätsprüfung von Kunststoffen mittels FTIR-Spektroskopie	48
7	Bemessung von Bauteilen	49
7.1	Bemessung mit abgeminderten Festigkeitswerten	49
7.2	Bemessung anhand maximaler Verformungen	49
7.3	Elastomere Baulager	50
8	Halbzeuge und Fertigprodukte für das Bauwesen	52
8.1	Fertigteile aus Thermoplasten	52
8.2	Fertigteile aus Duroplasten	52
8.3	Faserverstärkte Kunststoffe	52
8.4	Schaumkunststoffe	55
8.5	Sandwichelemente	56
8.6	Folien, Dichtungsbahnen, Geotextilien	56
8.7	Fugenbänder	57
8.8	Lager	57
9	Am Bauwerk erhärtende Kunststoffe	61
9.1	Oberflächenschutz von porösen Baustoffen	61
9.1.1	Imprägnierungen	61

9.1.2	Versiegelungen	62
9.1.3	Beschichtungen	62
9.2	Verpressen von Rissen und Fehlstellen	62
9.3	Bindemittel für Mörtel	63
9.4	Fugenmassen	64
9.5	Klebstoffe für tragende Konstruktionen	65
10	Arbeits- und Umweltschutz	66
11	Literatur	67

1 Chemie der organischen Baustoffe

1.1 Allgemeines

Als organische Chemie wird die Chemie der Stoffe verstanden, die Kohlenstoffverbindungen enthalten. Ausgenommen hiervon ist unter anderem der Kohlenstoff selbst, Carbide, Carbonate, Kohlenstoffmonoxid und -dioxid. Kohlenstoffverbindungen spielen im Bauwesen sowohl als Hilfsstoffe (Lösung- und Verdünnungsmittel, Füllstoffe, Zusatzmittel) als auch direkt als Baustoffe (Holz, Kunststoffe, bitumenhaltige Bindemittel) eine nicht zu unterschätzende Rolle [Lit 1].

Neben Kohlenstoff sind nur noch wenige Elemente am Aufbau der organischen Verbindungen beteiligt, so etwa H, O, N, S und P, selten noch Halogenide. Dennoch gibt es viel mehr bekannte organische (~ fünf Millionen) als anorganische Verbindungen (~ 500000). Diese Vielfalt liegt in den besonderen Eigenschaften des Kohlenstoffs begründet. Der Kohlenstoff kann sich nämlich als große Ausnahme praktisch unbegrenzt mit sich selber verbinden zu Ketten, Ringen, Netzen, Brücken etc.

Zur Vereinfachung werden bei der graphischen Darstellung der Kohlenstoffverbindungen oftmals die Wasserstoffatome und in einer weiteren Vereinfachung auch die Kohlenstoffatome weggelassen. In den entstehenden Strichzeichnungen bilden die Kohlenstoffatome gedanklich die End- bzw. Eckpunkte.

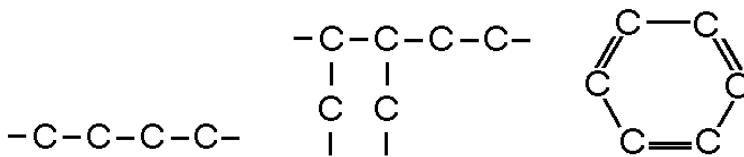


Bild 1: Anordnung von Kohlenstoff in unverzweigten und verzweigten Ketten, einfachen und kombinierten Ringen

1.2 Kohlenwasserstoffe

Der Begriff **Kohlenwasserstoffe** ist eine allgemeine Bezeichnung für eine Klasse organischer Verbindungen (häufig auch abgekürzt mit KW oder C_xH_y), die sich ausschließlich aus Kohlenstoff und Wasserstoff zusammensetzen. Die meisten Vertreter der Kohlenwasserstoffe zählen zu den einfachsten organischen Verbindungen. Deshalb lassen sie sich als Stammsubstanzen aller anderen organischen Verbindungen auffassen. Ab drei Kohlenstoffatomen können sie entweder

- offenkettig (**aliphatisch** oder azyklischen) (z.B. n-Butan) (Bild 2) oder
- ringförmig (**alicyklischen**) (z.B. Cyclohexan) (Bild 3)

miteinander verbunden sein. Die ringförmigen Verbindungen lassen sich nochmals unterteilen in alicyklische und aromatische (benzoide) Kohlenwasserstoffe.

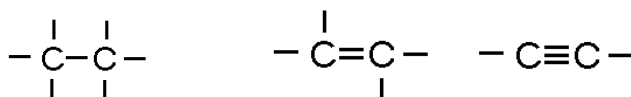


Bild 2: Gesättigte (links) und ungesättigte Kohlenwasserstoffverbindung (Doppelbindung (Mitte), Dreifachbindung (rechts))

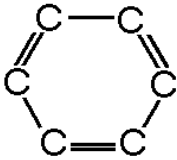


Bild 3: Zyklische Kohlenwasserstoffe als einfacher Ring (Benzol)

Bei den offenkettigen Verbindungen mit mehr als einem Kohlenstoffatom sind die Kohlenstoffatome innerhalb des Moleküls zu einer Kette miteinander verknüpft. Diese kann je nach Art eine oder mehrere Verzweigungen aufweisen. Bei den zyklischen Kohlenwasserstoffen sind die Kohlenstoffatome zu einem oder mehreren geschlossenen Ringen angeordnet. Alizyklische Ringe entsprechen in ihrer Bindung und ihren Eigenschaften den aliphatischen Kohlenwasserstoffen. Die aromatischen Ringe besitzen besondere Bindungsstrukturen.

Diese zwei Gruppen lassen sich nochmals anhand ihres chemischen Verhaltens in **gesättigte** und **ungesättigte Verbindungen** unterteilen. Der Zusatz „gesättigt“ bedeutet, diese Kohlenwasserstoffe enthalten keine Mehrfachbindungen – im Gegensatz dazu sind bei den „ungesättigten“ Verbindungen Doppel- und Dreifachbindungen im Molekül vorhanden. Eine besondere Rolle nehmen in diesem Zusammenhang die so genannten aromatischen Kohlenwasserstoffe ein (z.B. Benzol, Toluol oder Anthracen).

1.2.1 Alkane (Paraffine)

Die gesättigten offenkettigen Kohlenwasserstoffe bilden die homologe (d.h. strukturell eng verwandte) Reihe der Alkane oder Paraffine. Ihre Zusammensetzung entspricht der Summenformel C_nH_{2n+2} , wobei n die Anzahl der Kohlenstoffatome im Molekül ist. Die ersten Vertreter der Reihe heißen Methan (CH_4), Ethan (C_2H_6) (Bild 4), Propan (C_3H_8) und Butan (C_4H_{10}). Allen gemeinsam ist ihre Reaktionsträgheit (**parum**: lat. = wenig; **affinis**: lat. = beteilig (an Umsetzungen)), d. h., sie reagieren bei gewöhnlichen Temperaturen kaum mit Säuren, Basen, Alkalien oder Oxidationsmitteln. Bei Normaltemperatur und -druck liegen die ersten vier Vertreter der Reihe als Gase vor. Die restlichen Vertreter sind flüssig, halbfest oder fest.

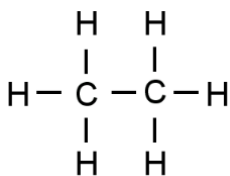


Bild 4: Ethan (C_2H_6)

Die Alkane sind symmetrisch gebaut und haben daher kein Dipolmoment. Sie sind deshalb unlöslich in polaren Lösungsmitteln wie Wasser. Alkane werden als hydrophob und lipophil (fett liebend) bezeichnet.

Erdöl enthält eine Vielzahl gesättigter Kohlenwasserstoffe. Erdölprodukte wie Benzin, schweres Heizöl, Schmieröl, Rohvaseline (Petrolat) und Petroleum bestehen hauptsächlich aus Gemischen von leichteren flüssigen bis hin zu festen Paraffinkohlenwasserstoffen.

1.2.2 Alkene (Olefine)

Die Alkene oder Olefine werden aus offenkettigen Kohlenwasserstoffen mit einer Doppelbindung zwischen zwei Kohlenstoffatomen gebildet. Die allgemeine Formel für die Reihe lautet C_nH_{2n} , wobei n der Anzahl der Kohlenstoffatome im Molekül entspricht. Wie in

der Alkanreihe sind die Verbindungen mit wenig Kohlenstoffatomen Gase, dann folgen Flüssigkeiten, die schwereren Vertreter liegen in fester Form vor. Die Olefine sind chemisch aktiver als die gesättigten Verbindungen. Sie reagieren leicht mit Stoffen wie den Halogenen, deren Atome sich an die Doppelbindungen anlagern können. In Naturprodukten treten Olefine überhaupt nicht auf. Dafür entstehen sie bei der trockenen Destillation komplexer natürlicher Stoffe, beispielsweise Kohle, sowie in großen Mengen bei der Erdölraffination, insbesondere bei den Crackverfahren (Steamcracker). Die ersten Olefine in dieser Reihe sind Ethylen (Ethen) (C_2H_4) (Bild 5), Propylen (Propen) (C_3H_6) und Butylen (Buthen) (C_4H_8).

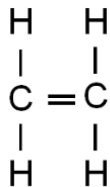


Bild 5: Ethylen (C_2H_4)

Technisch bedeutungsvoll ist die Eigenschaft der Alkene unter Auflösen der Doppelbindung zu polymerisieren und so lange Molekülketten zu bilden. Ein Beispiel hierfür ist die Polymerisation von Ethylen zu Polyethylen.

Die **Diene** enthalten zwei Doppelbindungen im Molekül, diese liegen zwischen Paaren von Kohlenstoffatomen (allgemeine Formel C_nH_{2n-2}). Sie sind mit den komplexen Kohlenwasserstoffen in Naturkautschuk verwandt und spielen u.a. eine wichtige Rolle bei der Herstellung von Synthetikautschuk und Kunststoffen. Bedeutende Vertreter der Diene in der chemischen Verfahrenstechnik sind Butadien (1,3-Butadien) (C_4H_6) und Isopren (2-Methylbutadien) (C_5H_8).

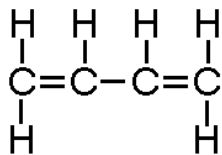


Bild 6: Butadien (C_4H_6)

1.2.3 Alkine (Ethine)

Die Vertreter der Alkinreihe enthalten im Molekül eine Dreifachbindung zwischen zwei Kohlenstoffatomen (allgemeine Formel C_nH_{2n-2}). Sie sind chemisch sehr aktiv, sodass sie in der Natur nicht in freier Form vorkommen. Die von ihnen gebildete Reihe lässt sich mit der Alkenreihe vergleichen. Ihr erster und gleichzeitig wichtigster Vertreter ist Acetylen (C_2H_2) (Bild 7). Acetylen oder auch Ethin wird beispielsweise zur Herstellung von Acrylsäure (z.B. für die Kunststoff- und Lackproduktion), Vinylchlorid (Bild 8) oder zur Erzeugung von Acetylenruß (z. B. als Füllstoff in der Reifenproduktion) eingesetzt.



Bild 7: Ethin (C_2H_2)

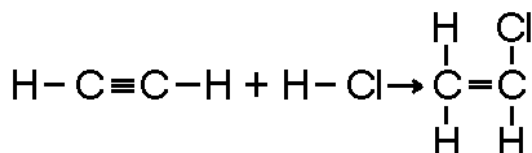


Bild 8: Herstellung von Vinylchlorid aus Ethin und Chlorwasserstoff

1.2.4 Aromatische Kohlenwasserstoffe, Arene

Der einfachste der gesättigten cyclischen Kohlenwasserstoffe (oder Cycloalkane) ist das Cyclopropan (C_3H_6). Das Molekül besteht aus drei Kohlenstoffatomen, von denen jedes noch zwei Wasserstoffatome angelagert hat. Cyclopropan ist reaktionsfreudiger als das entsprechende offenkettige Alkan, das Propan (C_3H_8). Andere Cycloalkane sind in gewöhnlichem Erdöl enthalten (insbesondere Cyclohexan).

Einige der ungesättigten cyclischen Kohlenwasserstoffe mit der allgemeinen Formel $C_{10}H_{16}$ findet man in bestimmten aromatischen Naturölen, die aus Pflanzenmaterialien destilliert werden. Dazu gehören beispielsweise Pinen (in Terpentinöl) und Limonen (in Zitronen- und Orangenölen). Der Oberbegriff für diese Stoffklasse ist Terpene.

Die wichtigste Gruppe ungesättigter Kohlenwasserstoffe sind die aromatischen Verbindungen, die beispielsweise in Steinkohlenteer auftreten. Die Aromaten könnten, weil sie nicht gesättigt sind, im Grunde andere Substanzen anlagern. Bei ihren Reaktionen werden jedoch hauptsächlich die Wasserstoffatome durch andere Atome oder Atomgruppen ersetzt oder substituiert. Zu den aromatischen Kohlenwasserstoffen gehören u. a. Benzol, Toluol, Anthracen und Naphthalin.

Der Grundbaustein aller aromatischen Verbindungen ist Benzol (vgl. Bild 3). Der Benzolring ist ein ebenes, völlig regelmäßiges Sechseck, der vereinfacht mit abwechselnd einfacher und doppelter Bindung zwischen den Kohlenstoffmolekülen dargestellt wird. Der wirkliche Zustand liegt zwischen den beiden in Bild 9 (links und Mitte) gezeigten *Kekulé*-Formeln. Kohlenwasserstoffe mit mindestens einem Benzolring werden als **Arene** bezeichnet.

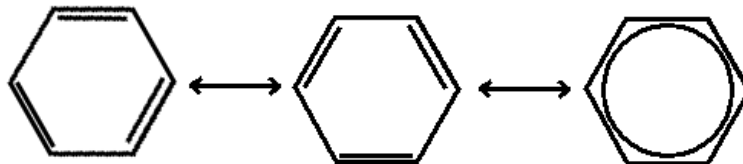


Bild 9: Darstellung des Benzolringes

1.3 Oxidationsprodukte der Kohlenwasserstoffe

1.3.1 Allgemeine Ableitung der aliphatischen Oxidationsprodukte

Geht man vom einfachsten Alkan, dem Methan, aus, wird durch Oxidation zunächst ein Alkohol erhalten, der allgemein als Alkanol bezeichnet wird. Im Fall des Methans ist es Methanol oder Methylalkohol. Durch weitere Oxidation entsteht Methanal (ältere Bezeichnung: Formaldehyd) und nach einer weiteren Oxidation schließlich eine organische Säure, hier Ameisensäure.

Die Oxidation kann solange weitergeführt werden, bis man am Ende nur noch Kohlendioxid und Wasser als die „normalen“ Verbrennungsprodukte der Kohlenwasserstoffe erhält.

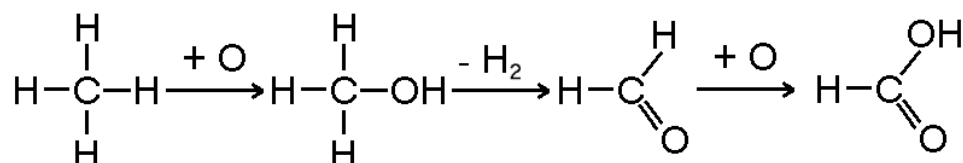


Bild 10: Oxidationsprodukt der Aliphaten (von links: Methan, Methanol, Methanal, Ameisensäure)

Die Oxidation erzeugt so genannte **funktionelle Gruppen**. Dieser Begriff bezeichnet ein Atom oder eine Atomgruppierung, die ein Wasserstoffatom einer Stammverbindung ersetzen kann. Die funktionelle Gruppe verleiht einer Verbindungsklasse charakteristische physikalische und chemische Eigenschaften und wird deshalb auch charakteristische Gruppe genannt, z.B. die Alkoholgruppe -OH. Ursache der veränderten Eigenschaften sind in der Regel die Unterschiede in der Elektronegativität zwischen den Heteroatomen (Nichtkohlenstoffatomen) wie O, N, S und den Kohlenstoffatomen. Aus diesen Unterschieden resultieren Polaritäten im Molekül [Lit 1].

1.3.2 Alkohole, Alkanole, Hydroxylgruppe [Lit 2]

Alkohole sind Derivate aliphatischer oder alizyklischer Kohlenwasserstoffe, in denen ein oder mehrere Wasserstoffatome durch Hydroxylgruppen (OH) ersetzt sind. Alkohole sind wasserhelle Flüssigkeiten, bei höherer Molekülmasse feste kristalline Körper. Die Namen der Alkohole (Alkanole) werden aus denen der Alkane mit gleicher Kohlenstoffanzahl und der Endsilbe -ol gebildet, z.B. Methanol, Äthanol. Je nach der Anzahl der OH-Gruppen im Molekül werden ein-, zweiwertige (Glykole) oder mehrwertige Alkohole unterschieden. Bei einwertigen Alkoholen unterscheidet man abhängig von der Stellung der OH-Gruppe im Molekül primäre, sekundäre und tertiäre Alkohole.

Alkohole geben in wässriger Lösung kein OH ab und reagieren nicht alkalisch.

Der Einfluss der funktionellen Gruppe auf die chemischen und physikalischen Eigenschaften der Verbindung wird bei den Alkoholen besonders deutlich, da die OH-Gruppe deren Moleküle „wasserähnlich“ macht. Diese Ähnlichkeit geht bei den höheren Alkoholen und mit zunehmender Kettenlänge verloren und es überwiegt der hydrophobe Einfluss.

1.3.3 Ether, Äther [Lit 2]

Äther [griechisch aither „die obere Luft“] sind organische Verbindungen der allgemeinen Formel $R^1 - O - R^2$. R^1 und R^2 können gleiche oder unterschiedliche Alkyl- oder Arylgruppen sein. Ether sind durch eine oder mehrere Etherbindungen $C - O - C$ gekennzeichnet. Sie entstehen aus Alkoholen durch das Abspalten von Wasser. Ether sind meist leicht flüchtige, brennbare Flüssigkeiten und treten in vielen Naturstoffen auf (Zucker, Stärke). Der wichtigste Ether ist der Diethylether, ein ausgezeichnetes Lösungsmittel für viele Stoffe, das aber extrem feuergefährlich (Siedepunkt $34,5\text{ °C}$) ist; Ether wurde früher auch als Narkosemittel verwendet.

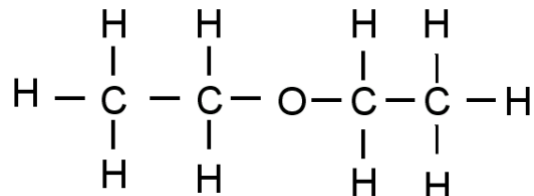


Bild 11: Diethylether

1.3.4 Carbonsäuren [Lit 2]

Carbonsäuren sind organische Säuren mit der Carboxylgruppe (-COOH) als funktionalem Element (Bild 12). Je nach deren Anzahl unterscheidet man Monocarbonsäuren, Dicarbonsäuren oder Polycarbonsäuren. Die aliphatischen Carbonsäuren (Alkan- und Alkensäuren) heißen auch Fettsäuren. Die meisten Carbonsäuren haben Trivialnamen (z.B. Ameisensäure, Essigsäure). Beispiele für aromatische Carbonsäuren sind Benzoesäure und

Terephthalsäure. Die systematischen Namen werden aus denen der Stammkohlenwasserstoffe und der Endung -carbonsäure gebildet.

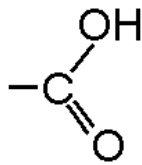


Bild 12: Carboxylgruppe

Carbonsäuren sind im Allgemeinen gut wasserlöslich und dissoziieren meist in geringem Umfang in H^+ -Ionen und einen Säurerest. Die aliphatischen Monocarbonsäuren mit bis zu 3 Kohlenstoffatomen sind stechend riechende, wasserlösliche Flüssigkeiten. Mit steigender C-Atom-Zahl sinkt die Wasserlöslichkeit. Carbonsäuren mit 4 - 9 C-Atomen riechen ranzig. Carbonsäuren mit über 10 Kohlenstoffatomen sind geruchlose, wachsartige Feststoffe. Aliphatische Dicarbonsäuren und aromatische Carbonsäuren sind ebenfalls fest. Mit Alkoholen bilden Carbonsäuren Ester. Carbonsäuren und ihre Derivate sind wichtige Zwischenprodukte zur Herstellung von Kunststoffen und Lösungsmitteln und treten daher häufig in Gebäuden der Nahrungs-, Genussmittel- und Futtermittelindustrie auf. Sie können Beton und z.T. auch Metalle schädigen.

1.3.5 Alkanale, Aldehyde, Aldehydgruppe [Lit 2]

Aldehyde [von Alcoholus **dehydratus**] sind organische Verbindungen mit der Aldehyd- oder Formylgruppe $-CHO$ als endständiger Gruppe. Sie werden gebildet durch Dehydrierung primärer Alkohole, Oxidation von Alkenen oder Oxosynthese (Reaktion von Alkenen mit Kohlenmonoxid und Wasserstoff). Die systematischen Namen der aliphatischen Aldehyde (Alkanale) werden aus dem zugehörigen Kohlenwasserstoff (Methan, Äthan usw.) und der Endsilbe -al gebildet (Methanal, Äthanal usw.). Aldehyde werden verwendet als Geschmacks- und Riechstoffe, wie Benzaldehyd und Citral (Geruch nach bitteren Mandeln beziehungsweise Zitrone) und Vanillin, aber auch als Desinfektionsmittel oder als Rohstoff für Kunststoffe (z.B. Formaldehyd (Methanal) oder Acrolein (Propenal)).

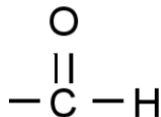


Bild 13: Aldehyd-Gruppe

Niedermolekulare Aldehyde haben einen stechenden, mitunter unangenehmen Geruch. Sie sind reaktionsfähiger als Alkohole und neigen besonders bei niedrigerem Molekulargewicht zur Polymerisation und zur Additionsreaktion.

1.3.6 Ketone [Lit 2]

Ketone sind organische Verbindungen, bei denen die Carbonylgruppe $>C=O$ an Alkyl- oder Arylgruppen gebunden ist. Der einfachste aliphatische Vertreter ist das Aceton ($CH_3(CO)CH_3$), das einfachste aromatische Keton das Benzophenon (Diphenylketon), $C_6H_5-CO-C_6H_5$. Ketone sind u.a. Lösemittel und Riechstoffe. Ketonverbindungen sind u.a. intermediäre Stoffwechselprodukte (Ketonkörper). Ketonharze sind meist sehr helle Kunstharze, die besonders in der Lackindustrie eingesetzt werden.

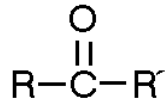
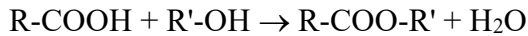


Bild 14: Baustruktur eines Ketons

1.3.7 Ester [Lit 2]

Der Begriff Ester ist ein Kunstwort, das aus **Essig** und **Äther** zusammengesetzt wurde. Ester sind organische Verbindungen, die formal aus Säuren und Alkoholen unter Wasseraustritt entstehen:



R und R' sind organische Reste.

Ester werden auch durch Umesterung aus anderen Estern oder aus Olefinen hergestellt. Durch Hydrolyse (Verseifung) können Ester in Säure und Alkohol zurückgespalten werden. Viele Ester sind fruchtartig riechende Flüssigkeiten. Glycerinester von Fettsäuren treten in der Natur als Fette, Öle und Wachse auf. Phthalsäureester haben als Weichmacher, der Methylester der Terephthalsäure hat bei der Herstellung von Polyestern Bedeutung

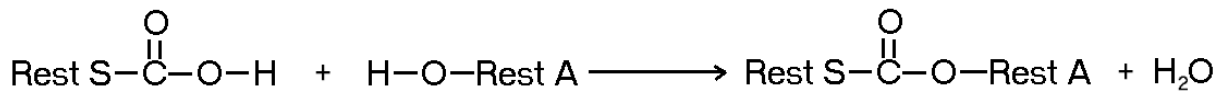


Bild 15: Bildungsschema von Ester

Die der Veresterung entgegen gesetzte Umsetzung ist die Verseifung. Ursprünglich wurde unter der Verseifung die hydrolytische Spaltung der Fette (Glycerin-Fettsäure-Ester) durch Kochen mit wässrigen Alkalien zu Glycerin und Seifen (Alkalisalze der Fettsäuren) verstanden. Heute wird Verseifung allgemein als Bezeichnung für die hydrolytische Spaltung von Estern zu Säuren und Alkoholen verwendet.

Da Ester durch Laugen zerstört werden, können Speisefette, die ebenfalls Ester darstellen, durch den alkalischen Beton oder Mörtel verseift werden. Der Calciumanteil des Bindemittels wird dabei gelöst und in Form organischer Salze gebunden. Der Beton wird angegriffen.

Polymere im direkten Kontakt mit Beton und Mörtel müssen daher verseifungsbeständig sein (wichtig für Kleber, Haftbrücken usw.).

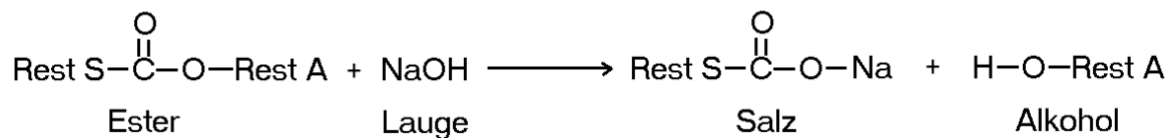


Bild 16: Schema der Verseifungsreaktion

2 Einführung in die Kunststoffe [Lit 8]

2.1 Allgemeines

Die Verwendung von Kunststoffen im Bereich der Technik umfasst sehr unterschiedliche Bereiche.

Bild 17 zeigt, wie sich 2023 in Deutschland verarbeitete Kunststoffe (12,8 Mio. t) auf die verschiedenen Einsatzgebiete verteilen. Innerhalb der einzelnen Branchen haben die einzelnen Kunststoffe eine sehr unterschiedliche Bedeutung (Bild 18).

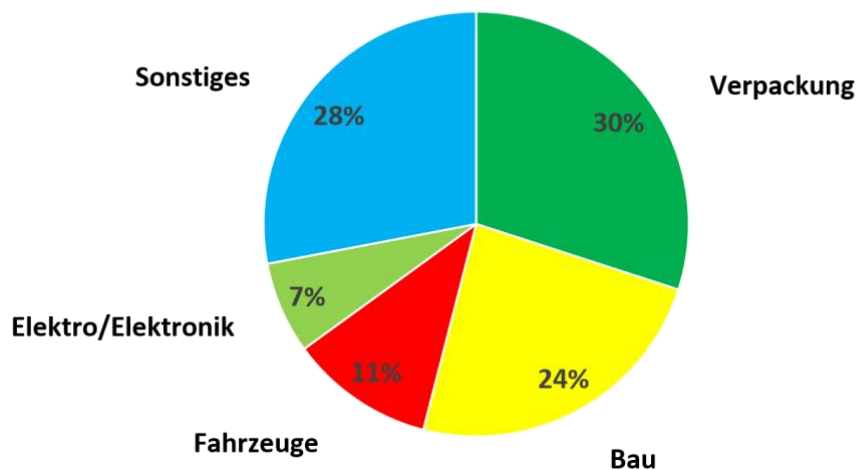
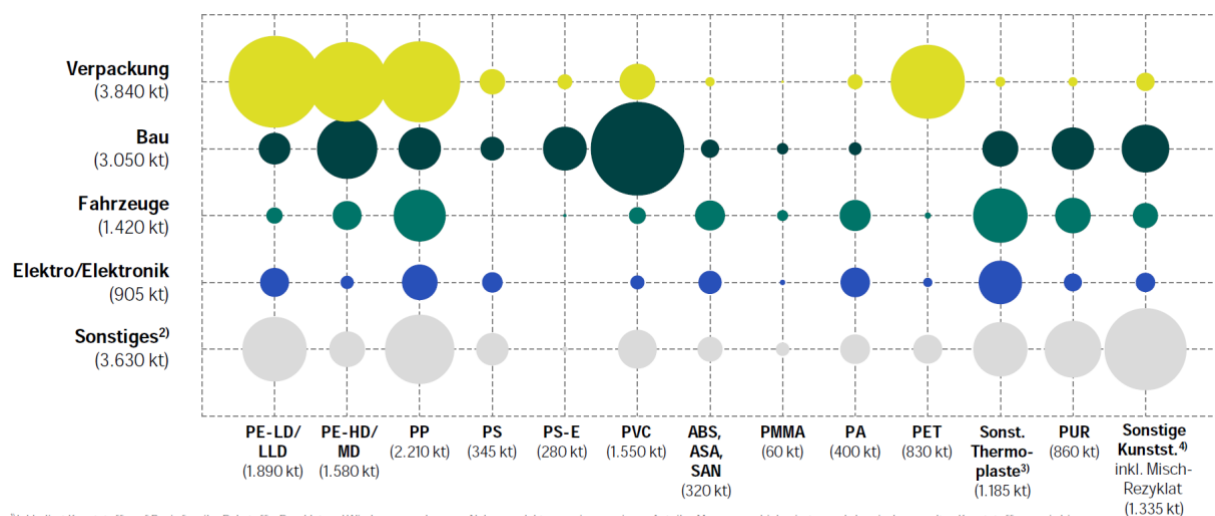


Bild 17: Einsatzgebiete von Kunststoffen in Deutschland in 2023 [Lit 11]



¹⁾ Inkludiert Kunststoffe auf Basis fossiler Rohstoffe, Rezyklat und Wiederverwendung von Nebenprodukten sowie zu geringen Anteilen Mengen aus biobasierten und chemisch recycelten Kunststoffen sowie bio-attributed Kunststoffen und Rohstoffe aus carbon-captured utilisation ²⁾ Zu sonstigen Anwendungen gehören u.a. Haushaltswaren, Sport-/Spiel-/Freizeitartikel, inkl. Sportschuhe, Möbel, Landwirtschaft, Gartenbau, Forstwirtschaft, Medizin, Maschinen, Geräte- und Anlagenbau, Schreib- und Zeichengeräte ³⁾ Sonstige Thermoplaste sind u.a. POM, PC, PBT, Blends ⁴⁾ Zu sonstigen Kunststoffen u.a. Epoxid-, Phenol- und Polyesterharze, Melaminharze, Harnstoffharze sowie zahlreiche Spezialkunststoffe für viele kleinere Anwendungen, häufig mit Produktionsmengen deutlich <50 kt p.a.

Bild 18: Menge der wichtigsten verarbeiteten Kunststoffe in Deutschland nach Branchen und Kunststoffen (2023) [Lit 11]

In der Bauindustrie werden Kunststoffe beispielsweise im Bereich des Wärmeschutzes, Korrosionsschutz, Isolation, Rohrleitungen, usw. verwendet (Bild 19). Eine stetig wachsende Bedeutung ergibt sich im Bereich ingenieurmäßig zu bearbeitender Konstruktionen und Bauteile, obwohl der mengenmäßige Anteil gegenüber den herkömmlichen Baustoffen für tragende Bauteile gering ist.

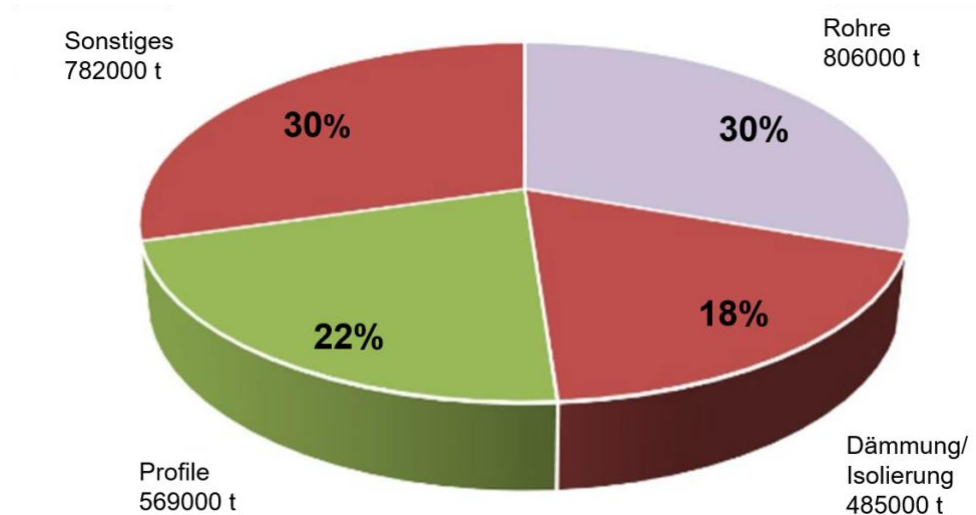


Bild 19: Typische Anwendungen der Kunststoffe im Bauwesen in Deutschland (2017) [Lit 12]

2.2 Begriffe

Kunststoffe sind hochmolekulare, vorwiegend organische Stoffe, die entweder synthetisch oder durch Umwandlung von Naturstoffen gewonnen werden.

Vollsynthetische Kunststoffe werden aus niedermolekularen Ausgangsstoffen wie Erdöl, Kohle, Erdgas, Kalk, Kochsalz, Wasser hergestellt.

Halbsynthetische Kunststoffe werden aus hochmolekularen Naturstoffen wie Zellulose, Naturkautschuk, Eiweiß durch entsprechende Aufbereitung bzw. Abwandlung hergestellt.

Am Aufbau der Kunststoffe sind vorwiegend die Elemente Kohlenstoff C, Wasserstoff H und Sauerstoff O beteiligt. Weitere Elemente für wichtige Kunststoffgruppen sind:

- Chlor: für Polyvinylchlorid (PVC),
- Fluor: für Polytetrafluorethylen (PTFE), z.B. Teflon,
- Schwefel: für Polysulfidkautschuk, z.B. Thiokol,
- Silicium: für Siliconöle, Siliconkautschuke,
- Stickstoff: für Polyamide (PA), z.B. Nylon.

Kunststoffe werden einerseits in fester vollsynthetisierter Form als Fertigprodukt oder als Halbzeug geliefert, andererseits in flüssiger, noch nicht vollsynthetisierter Form als Kunstharz oder Reaktionsharz. Diese härten erst auf der Baustelle durch chemische Reaktion aus. Zu dieser zweiten Gruppe zählen die Fugenmassen und Ortschäume sowie gewisse Anstrich- und Klebstoffe.

2.3 Allgemeine technische Merkmale

Kunststoffe haben zum Teil sehr deutlich voneinander abweichende Eigenschaften. Gemeinsame Merkmale der meisten Kunststoffe sind:

- geringe Dichte und Wärmeleitfähigkeit,
- große Zugfestigkeit, geringer Elastizitätsmodul,
- große Temperaturdehnung,
- große Diffusionsdichtigkeit und chemische Beständigkeit,
- großes elektrisches Isolationsvermögen,
- ausgeprägte Temperaturabhängigkeit des mechanischen Verhaltens,
- Brennbarkeit. Nur wenige Kunststoffe sind unbrennbar, viele jedoch schwer entflammbar,
- gut einfärbbar,
- niedrige zulässige Gebrauchstemperatur.

Das mechanische Verhalten von Proben aus Polyethylen (PE), Acrylglas (PMMA) und glasfaserverstärkten Reaktionsharzen (GFK) gegenüber konventionellen Baustoffen ist in Bild 20 beispielhaft dargestellt.

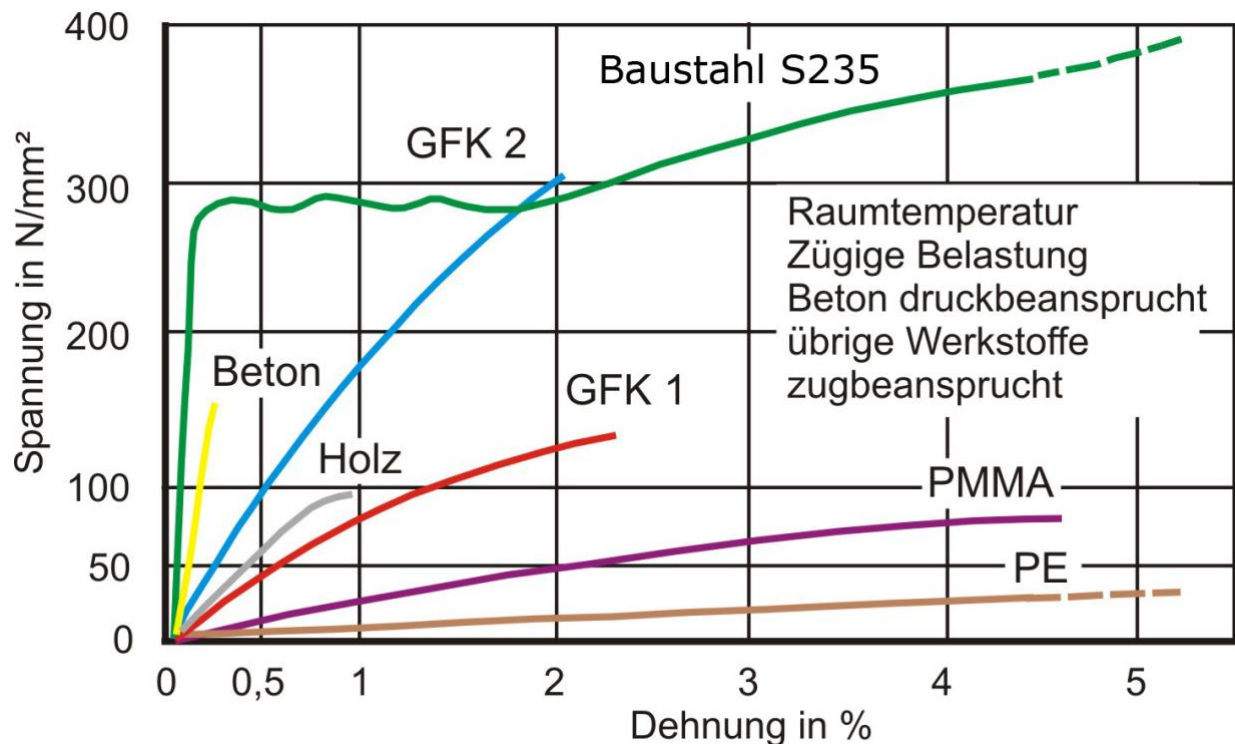


Bild 20: Spannungs-Dehnungs-Linien verschiedener Baustoffe [Lit 8]

Kunststoffe werden in ihrem mechanischen Verhalten schon durch relativ geringe Änderungen der Temperatur wesentlich stärker beeinflusst als alle anderen Baustoffe. Besonders deutlich äußert sich diese Abhängigkeit im Verformungsverhalten. Aber auch die Festigkeit bei Kurz- und Langzeitbeanspruchung ist temperaturabhängig (Bild 21).

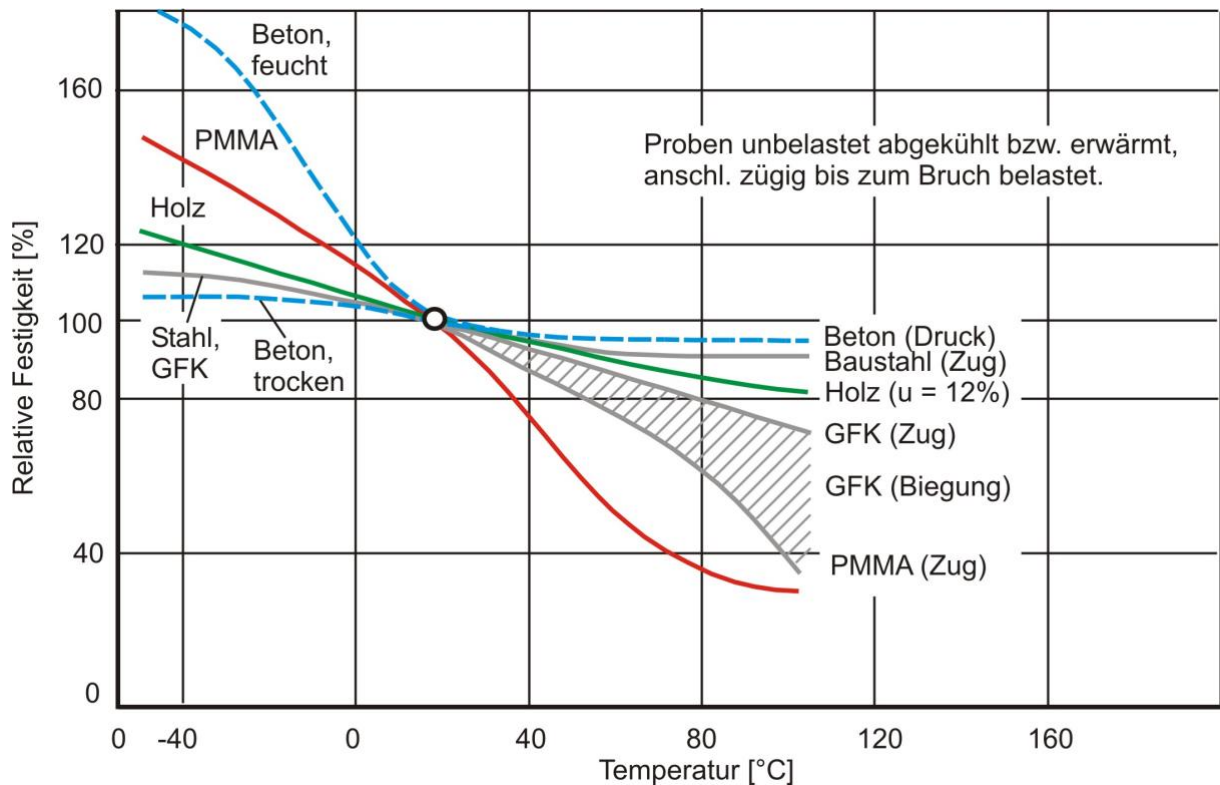


Bild 21: Kurzzeitfestigkeit verschiedener Baustoffe bei unterschiedlicher Temperatur [Lit 8]

Die Langzeitfestigkeit von Kunststoffen ist erheblich kleiner als die Kurzzeitfestigkeit und wird von erhöhter Temperatur und Umwelteinflüssen wie UV-Strahlung, Ozon, Chemikalien beeinträchtigt. Dieser Vorgang wird als **Alterung** bezeichnet. Für die mechanischen Eigenschaften können daher im strengeren Sinne keine Kennwerte angegeben werden, sondern nur Kennfunktionen. Die **Dauerschwingfestigkeit** wird erst oberhalb von $2 \cdot 10^7$ Lastwechseln erreicht, sofern überhaupt ein Grenzwert vorhanden ist (vgl. Kapitel 6.2.3). Infolge der inneren Dämpfung erwärmt sich der Kunststoff unter der Schwingung.

3 Aufbau der Kunststoffe

3.1 Bildungsmechanismen

Kunststoffe werden in der Regel synthetisiert, indem gleichartige Grundbausteine, die Monomere, zu kettenförmigen, verzweigten oder vernetzten Makromolekülen, den Polymeren, zusammengefügt werden. Dabei können die Monomere aus zwei oder mehr verschiedenartigen Stoffen aufgebaut sein. Der Polymerisationsgrad gibt an, aus wie vielen Monomermolekülen ein Makromolekül im Durchschnitt besteht.

Es werden drei grundsätzliche Bildungsmechanismen unterschieden:

- Polymerisation
- Polykondensation
- Polyaddition

3.1.1 Polymerisation

Bei der Polymerisation reagieren viele kleine **gleichartige Moleküle** zu sehr großen Molekülen. Die Monomere für Polymerisationen besitzen immer mindestens eine C-C-Doppelbindung. Mehr als eine reaktionsfähige Doppelbindung pro Monomer ist allerdings sehr selten. Die beiden C-Atome an der Doppelbindung können Wasserstoff, andere Atome oder auch ganze Atomgruppen tragen. Technisch werden fast ausschließlich Monomere verwendet, bei denen nur ein H-Atom durch ein anderes Atom oder eine meist recht kleine Atomgruppe substituiert ist [Lit 12].

Ein Beispiel für die Polymerisation ist Polyethylen. Im gasförmigen Ethylen (Ethen) C_2H_4 werden die Doppelbindungen aufgebrochen und es entsteht Polyethylen (Polyethen) (C_nH_{2n}) (Bild 22).

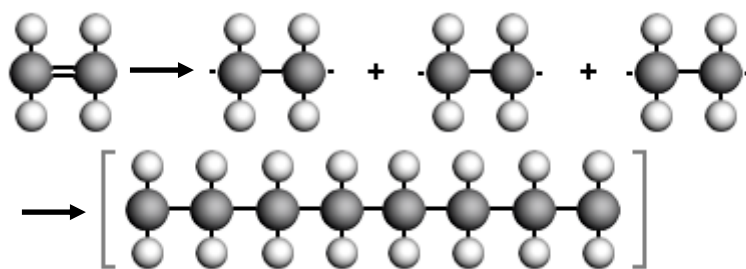


Bild 22: Polymerisation (hellgrau: Wasserstoffatom; dunkelgrau: Kohlenstoffatom)

Die Polymerisation ist eine Kettenreaktion, d.h., für den Start der Reaktion muss Energie von außen zugegeben werden. Die restliche Reaktion läuft von selbst ab. Beim Übergang vom flüssigen in den festen Zustand tritt ein relativ starkes Schrumpfen auf. Der gesamte Prozess der Polymerisation ist reversibel.

3.1.2 Polykondensation

Monomere für Polykondensationen sind bifunktional, das heißt, jedes Monomer besitzt zwei meist gleichartige, reaktionsfähige Gruppen. Es bedeutet gleichzeitig, dass in der Regel Paare von **zwei unterschiedlichen Monomeren** benötigt werden, also zum Beispiel ein Diol

(zweiwertiger Alkohol, z. B. Glykol) und eine Dikarbonsäure (z. B. Terephthalsäure). Aus solch einem Paar entsteht ein sehr großer Molekülkomplex, im vorliegenden Fall das Polyester Polyethylterephthalat (PET).

Die Verbindungen der Monomere werden durch das **Umlagern von Wasserstoffatomen** oder **Öffnen von Ringen** ermöglicht. Hierbei werden von beiden Moleküarten Atome abgespalten, die sich chemisch vereinigen und meist als Gase entweichen. Wegen dieser Abspaltung flüchtiger Stoffe ist diese Reaktionsart im Gegensatz zur Polymerisation **kein umkehrbarer Vorgang**. Beispiel: Glykol $C_2H_4(OH)_2$ (blaues Rechteck in (Bild 23)) reagiert mit Terephthalsäure $C_6H_4(COOH)_2$ (rotes Rechteck in (Bild 23)) unter Wasserabspaltung zu Polyester.

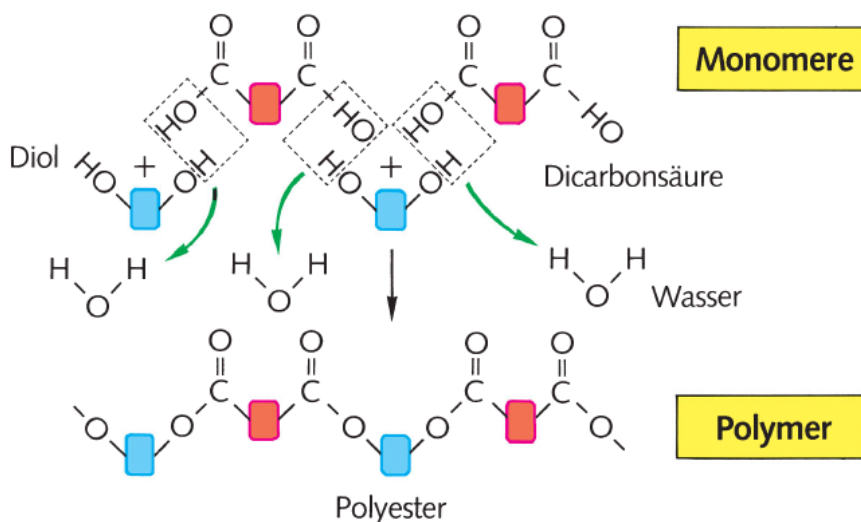


Bild 23: Polykondensation am Beispiel einer Polyesterbildung [Lit 13]

3.1.3 Polyaddition

Hierbei verbinden sich Moleküle von zwei unterschiedlichen Stoffen zu sehr großen Molekülen, wobei **Atome ihren Platz wechseln**, ohne dass hierbei ein Stoff abgespalten wird. Für die Beschreibung der Reaktion sind nur die funktionellen Gruppen von Bedeutung. Der Rest der Moleküle kann „eingekapselt“ werden (Bild 24). Die in Bild 24 gezeigten Strukturen mit ihren „eingekapselten“ Mittelteilen stehen für beliebige Diole bzw. Diisocyanate.

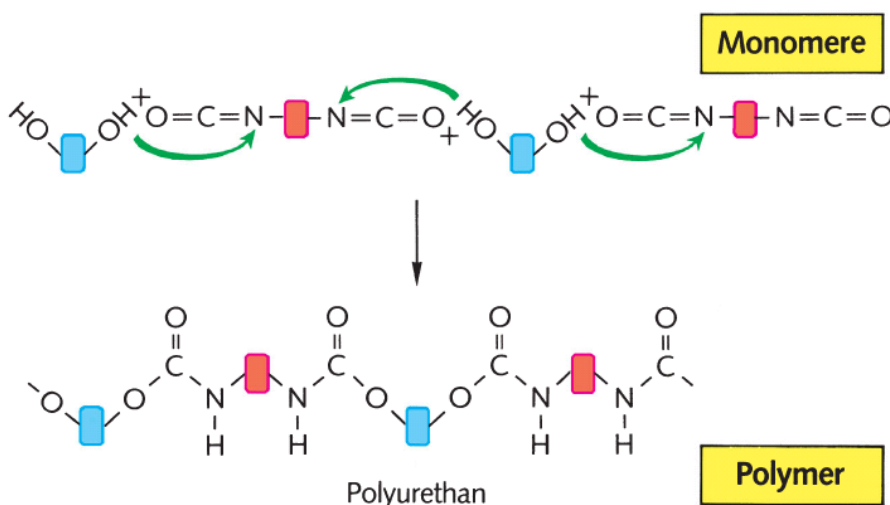


Bild 24: Prinzip der Polyaddition [Lit 13]

Für die Polyaddition werden zwei Reaktionskomponenten benötigt, die in einem genau abgestimmten Mischungsverhältnis vorliegen müssen. Die Reaktion läuft nur oberhalb einer gewissen Temperaturschwelle von selbst ab und kann durch Abkühlen unter diese Temperaturschwelle eingefroren werden. Wird die Temperatur wieder angehoben, so kann die Reaktion weiter ablaufen.

In Tabelle 1 sind die Ausgangsbedingungen und das Ergebnis der drei Bildungsmechanismen zusammengefasst.

Tabelle 1: Ausgangsbedingungen und Ergebnis der drei Bildungsmechanismen

Monomere	Verfahren der Polymerbildung (Eingang → Ausgang)	Polymere
z.B. Ethylen	Polymerisation Monomer + Starter ↓ Polymer + Wärme	z.B. Polyethylen
z.B. Glykol + Terephthalsäure	Polykondensation Monomer A + Monomer B + Starter ↓ Polymer + Wärme + Gas oder Wasser	z.B. Polyethylenterephthalat (PET)
z.B. Diepoxid + Diamin	Polyaddition Monomer A + Monomer B + Starter ↓ Polymer + Wärme	z.B. Epoxide

Die Reaktion wird durch Wärme, Druck, Strahlung oder/und Katalysatoren gestartet. Die bei der Reaktion frei werdende Wärme ist je nach Polymertyp unterschiedlich hoch. Bild 25 zeigt, wie sich eine Probe aus kalt härtendem Reaktionsharz bei der Polyaddition erwärmt und verfestigt. Läuft die Reaktion schon bei Temperaturen oberhalb von ca. +10 °C ab, wird von einer Kalthärtung gesprochen.

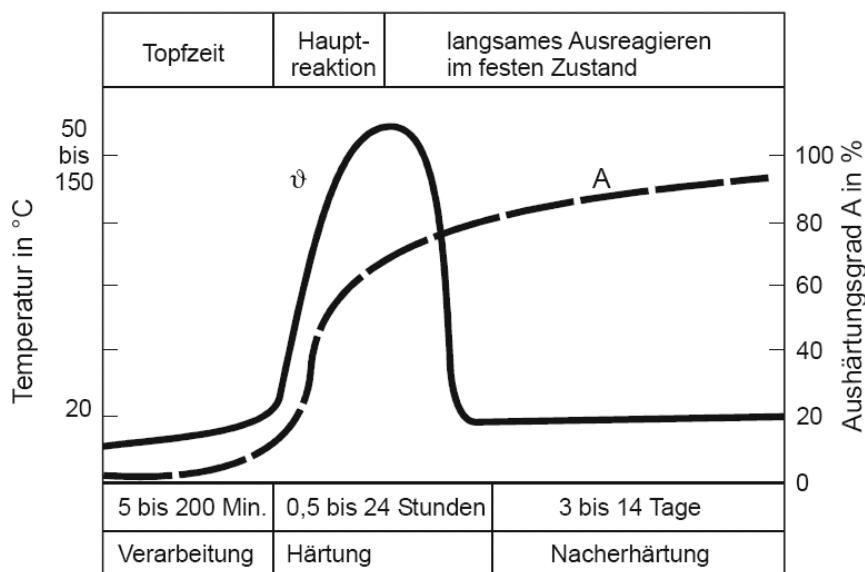


Bild 25: Temperaturverlauf beim Aushärten eines Reaktionsharzes [Lit 7]

3.2 Molekularstruktur und Bindungskräfte [Lit 8]

Die Molekularstruktur ist einerseits wichtig für die Eigenschaften und Verwendungsmöglichkeiten, andererseits zweckmäßig für die Einteilung der Kunststoffe. Kunststoffe haben entweder lineare, fadenförmige Makromoleküle oder dreidimensional vernetzte Makromolekülknäuel.

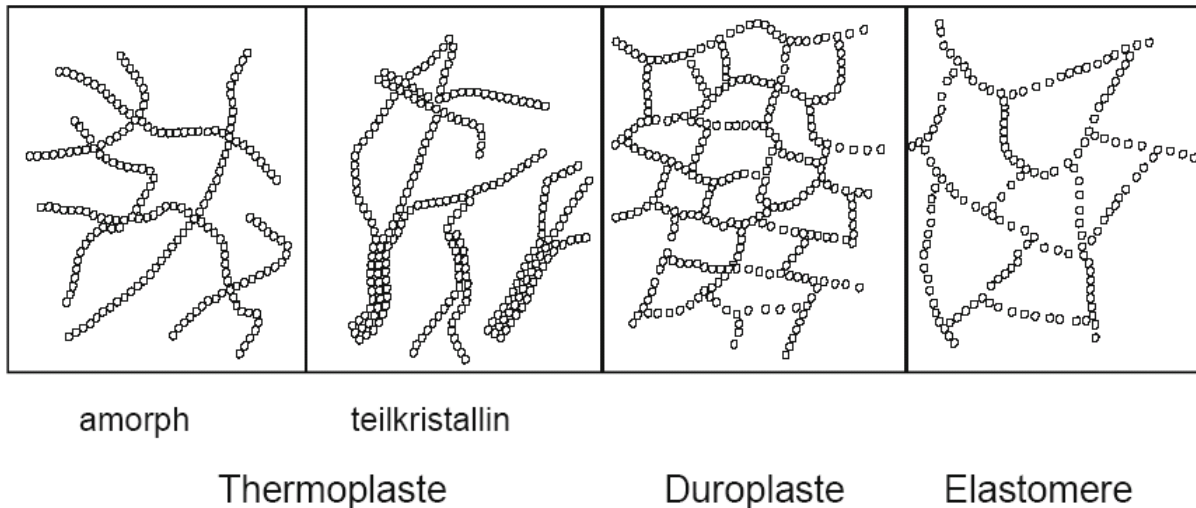


Bild 26: Molekularstrukturen [Lit 7]

Der Zusammenhalt innerhalb der Moleküle wird durch chemische Bindungskräfte gewährleistet. Die Moleküle untereinander werden durch physikalische Anziehungskräfte (Van-der-Waals-Kräfte) zusammengehalten.

Die Atome schwingen unter Wärmeeinfluss. Bei genügend hohen Temperaturen überträgt sich diese atomare Bewegung auf die Moleküle. Dadurch werden Kettensegmente und Vernetzungspunkte zu Schwingungen angeregt, ohne dabei den Schwerpunkt des Gesamtmoleküls zu verlagern, der Kunststoff wird weicher, d.h., er setzt einer mechanischen Beanspruchung geringeren Widerstand entgegen. Bei weiterer Steigerung der Temperatur werden die Wärmeschwingungen bei einem nicht vernetzten Kunststoff so stark, dass sich der Stoff wie eine hochviskose Flüssigkeit verhält.

3.3 Zustandsbereiche

Kunststoffe schmelzen nicht bei einer bestimmten Temperatur, sondern erweichen allmählich über einen bestimmten Temperaturbereich. Es liegen keine eindeutigen Aggregatzustände vor, vielmehr werden im Wesentlichen vier Zustandsbereiche hinsichtlich des thermisch-mechanischen Verhaltens unterschieden.

3.3.1 Glaszustand

Bei tiefen Temperaturen herrscht Mikro-Brown'sche Molekularbewegung, d.h. die Schwingungsbewegung von Atomen und Molekülteilen um ihre Ruhelage, sind so gering, dass man von einem „eingefrorenen“ Zustand oder Glaszustand spricht. Hierbei sind die makromolekularen Stoffe glasartig hart und spröde.

3.3.2 Übergangsbereich (Glasübergang)

Mit zunehmender Temperatur setzen Kunststoffe einer mechanischen Beanspruchung geringeren Widerstand entgegen und können nur noch einen Teil der eingebrachten Energie speichern. Als Übergangsbereich bezeichnet man die Temperaturspanne, in der die Abnahme der Steifigkeit und die Zunahme der Verformbarkeit mit höherer Temperatur überproportional ansteigen. Andere Namen dafür sind Einfrierbereich oder Erweichungsbereich.

Die starke Änderung der mechanischen Eigenschaften ist besonders bei amorphen Thermoplasten und weitmaschig vernetzten Elastomeren offenkundig. Eng vernetzte Duroplaste haben keine derartig ausgeprägte Zunahme der Verformbarkeit. Teilkristalline Thermoplaste verhalten sich in ihren kristallinen Bereichen elastisch.

3.3.3 Gummielastizität

Das mechanische Verhalten weitmaschig vernetzter amorpher Kunststoffe ist oberhalb der Glasübergangstemperatur vorwiegend „gummielastisch“. Diese Stoffe verhalten sich bei mechanischer Beanspruchung etwa so, wie es am ausgeprägtesten bei Elastomeren bereits bei Temperaturen im Bereich des Nullpunkts ist. In Bild 27 ist zu erkennen, dass oberhalb eines bestimmten Temperaturbereiches das Raumnetzwerk (a) beweglich und stark verformbar (b) ist.

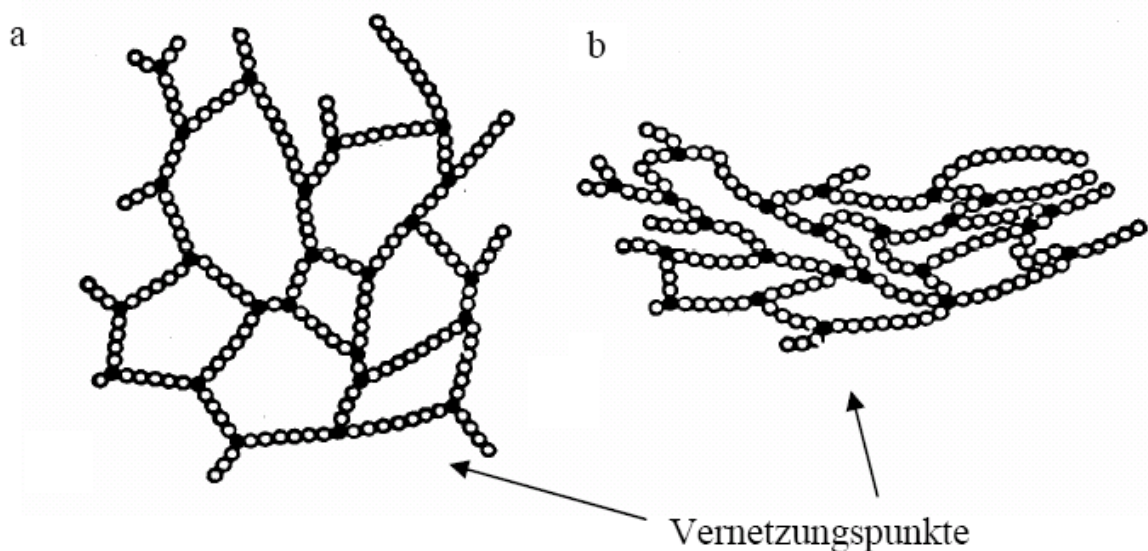


Bild 27: Schematische Darstellung des Molekülaufbaus eines weitmaschig vernetzten Polymers

3.3.4 Viskoses Fließen

Unvernetzte Kunststoffe zeigen neben gummielastischem Verhalten oberhalb der Glasübergangs- bzw. der Schmelztemperatur viskoses Fließen. Oberhalb einer Temperatur, die je nach Kunststoff zwischen 200 °C und 400 °C liegt, zersetzen sich alle Kunststoffe.

3.4 Einteilung der Kunststoffe nach Struktur und temperaturabhängigem Verhalten

3.4.1 Thermoplaste

Diese Kunststoffe bestehen aus physikalisch untereinander gebundenen linearen oder verzweigten Molekülketten. Bei Raumtemperatur sind sie hart und erweichen bei Erwärmung, bis sie schmelzen. Man unterscheidet amorphe und teilkristalline Thermoplaste mit teilweise zu Bündeln geordneten Fadenmolekülen.

Liegen die Molekülketten ungeordnet vor, so ist der Kunststoff amorph und lichtdurchlässig bis glasklar. Ihre physikalischen Eigenschaften sind nach allen Richtungen hin gleichartig (isotrop). Amorphe Thermoplaste befinden sich bei Raumtemperatur im Glaszustand (Bild 28). Zu diesen Kunststoffen gehören unter anderem Polystyrol (PS), Polyvinylchlorid (PVC) und Polycarbonat (PC).

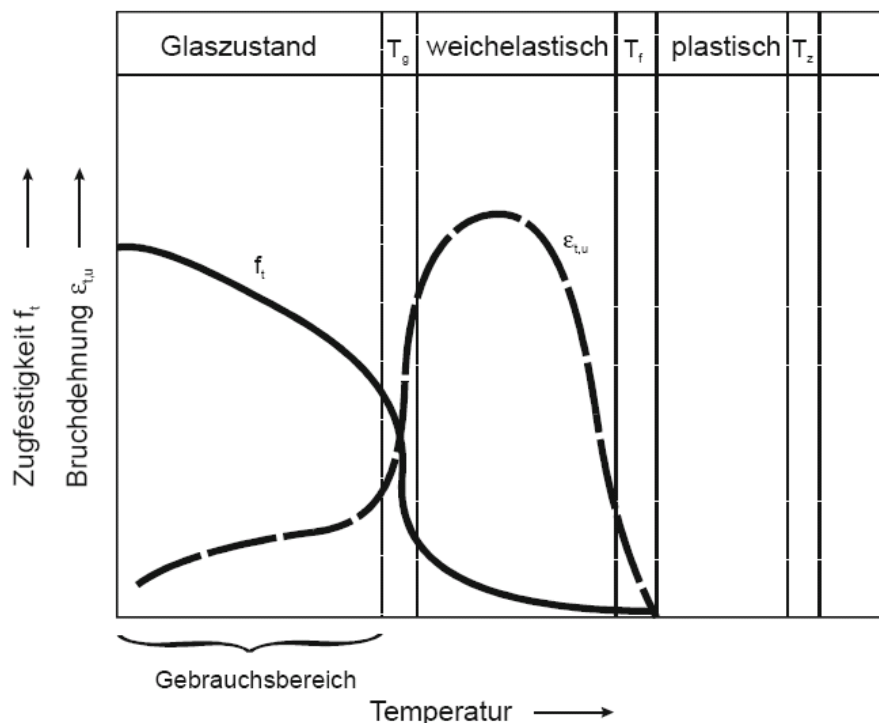


Bild 28: Temperaturabhängiges Festigkeits- und Verformungsverhalten amorpher Thermoplaste [Lit 7]

In teilkristallinen Kunststoffen lagern sich Abschnitte von Molekülketten in Bündeln aneinander, die Kristallite genannt werden und mehr oder weniger unregelmäßig in amorphe Bereiche eingestreut sind. Zwischen den kristallinen Bereichen sind die Moleküle lose geknäuel. Ihre Festigkeit und Zähigkeit erhalten die teilkristallinen Kunststoffe durch die Kristallite. Die geknäuelten Bereiche geben ihnen Elastizität. Teilkristalline Thermoplaste sind zähfest und können durch Recken auf eine höhere Festigkeit verstreckt werden. Sie verhalten sich im Glaszustand ähnlich wie amorphe Thermoplaste. Der Temperaturbereich des Glaszustands ist allerdings größer (Bild 29). Aufgrund des starken Zusammenhalts der Kristallite ist der Festigkeitsabfall bei Erreichen der Erweichungstemperatur nicht so ausgeprägt. Vertreter dieser Gruppe sind z.B. Polyethylen (PE), Polyamid (PA) und Polypropylen (PP).

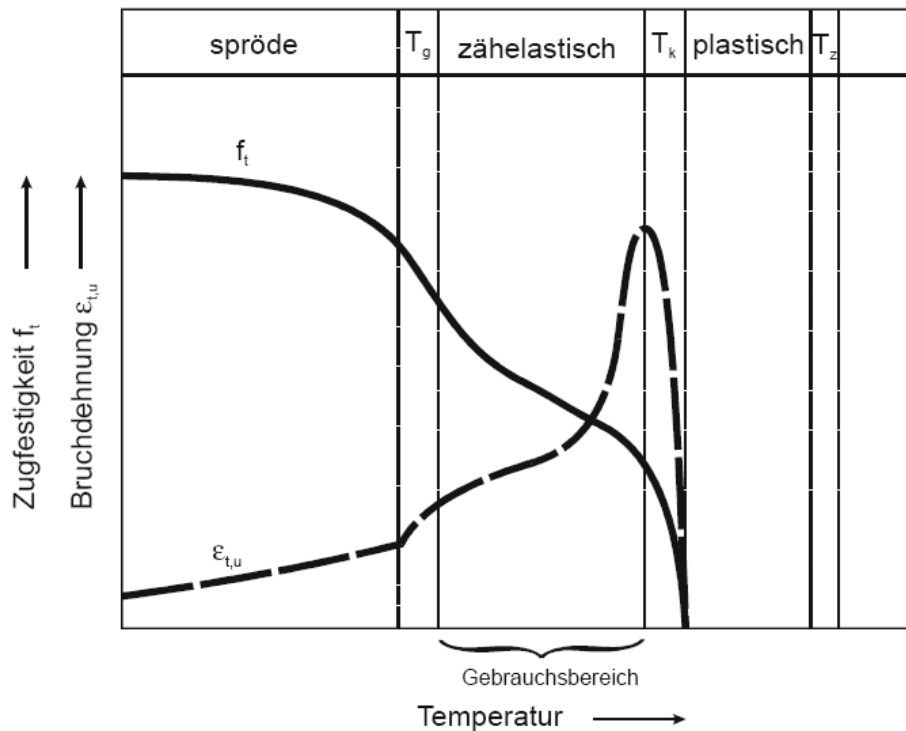


Bild 29: Temperaturabhängiges Festigkeits- und Verformungsverhalten teilkristalliner Thermoplaste [Lit 7]

3.4.2 Duroplaste

Der Werkstoff besitzt eng vernetzte Makromoleküle. Bei Raumtemperatur sind sie hart. Durch Erwärmen können sie zwar erweichen und dadurch einen Steifigkeitsverlust von bis zu zwei Zehnerpotenzen aufweisen. Sie zersetzen sich, ohne zuvor zu schmelzen (Bild 30).

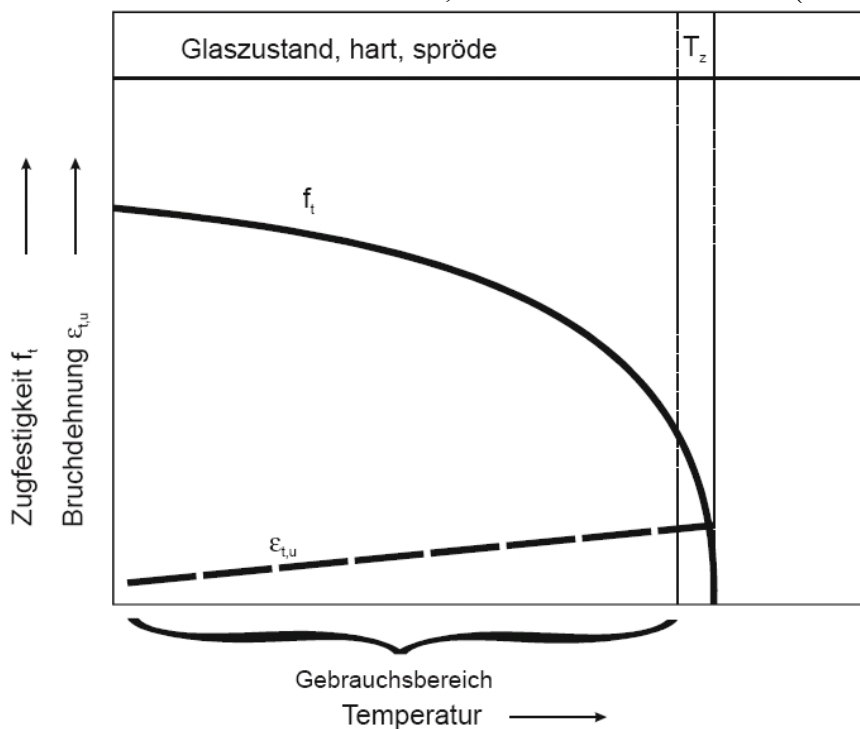


Bild 30: Temperaturabhängiges Festigkeits- und Verformungsverhalten von Duroplasten [Lit 7]

3.4.3 Elastomere

Sie bestehen aus weitmaschig vernetzten Molekülen, die im Temperaturbereich von 0 °C oder eventuell sogar -40 °C bis zur Zersetzungstemperatur gummielastisch sind. Elastomere sind mit geringer Spannung um mehrere 100 % dehnbar und kehren nach der Entlastung wieder in ihre ursprüngliche Form zurück. Ob Elastomere je nach Temperatur hart oder zäh verformbar sind, bestimmen die physikalischen Bindungskräfte, die gewöhnlich bei Raumtemperatur vorhanden sind.

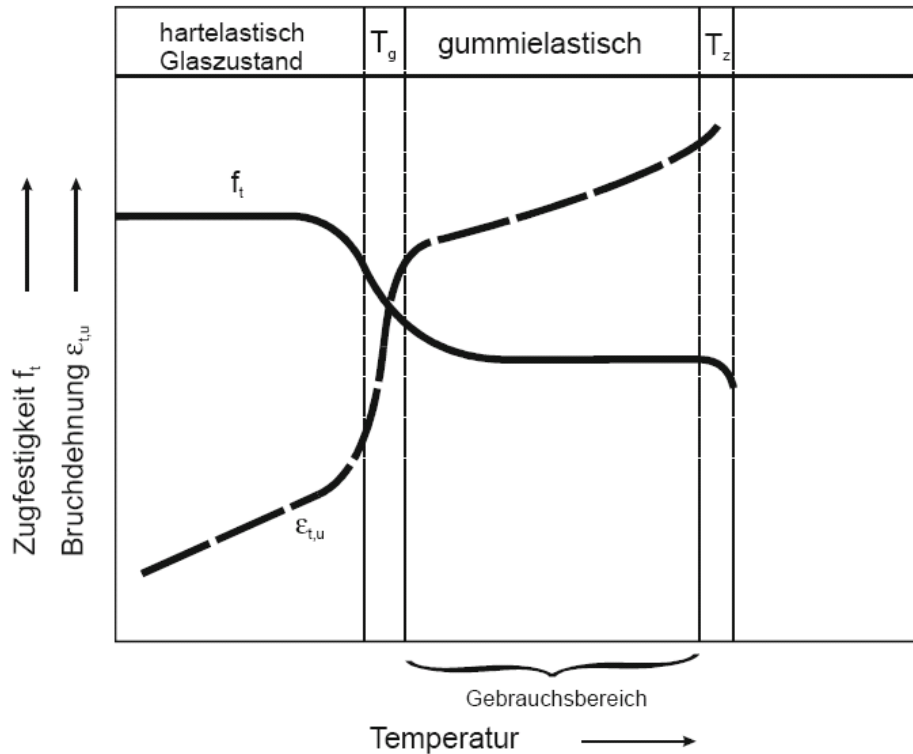


Bild 31: Temperaturabhängiges Festigkeits- und Verformungsverhalten von Elastomeren [Lit 7]

3.4.4 Thermoplastische Elastomere

Dies sind Thermoplaste, die sich aufgrund ihres molekularen Aufbaus ähnlich wie Elastomere verhalten. Sie schmelzen unter Wärmeeinwirkung, was einerseits bei der Formgebung von Vorteil ist, aber andererseits den Einsatz bei hohen Temperaturen begrenzt.

3.5 Einteilung von Kunststoffen nach Funktionen

Die Einteilung von Kunststoffen nach DIN 7724 erfolgt nicht anhand von Einzelwerten, sondern wird mit Funktionen vorgenommen. Hierfür bietet sich die Temperaturabhängigkeit viskoelastischer Kenngrößen an, insbesondere der so genannte komplexe Schubmodul und der komplexe Elastizitätsmodul. Der Verlauf des Schubmoduls bei unterschiedlichen Temperaturen spiegelt die Zustands- und Übergangsbereiche wieder, die der Kunststoff mit zu- oder abnehmender Temperatur durchläuft (Bild 32).

Anhand der Schubmodulkurven können die Kunststoffe in die Gruppen der Thermoplaste, Duroplaste und Elastomere eingeteilt werden. Die Kurven werden im Torsionsschwingversuchen ermittelt. Ein Schluss auf die für eine Bemessung maßgebenden

Verformungsmoduln E und G, die für die quasistatische Beanspruchung gelten, ist nur bedingt möglich.

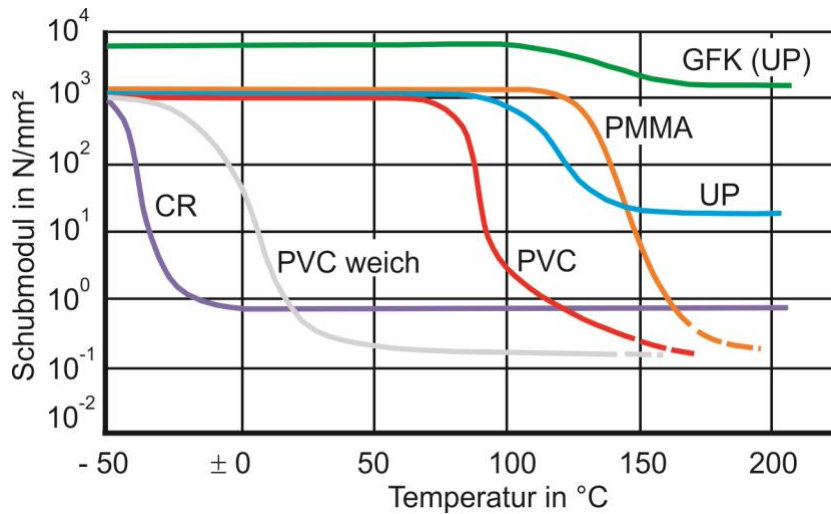


Bild 32: Schubmodul-Temperatur-Kurven [Lit 8]

Aus **rheologischer Sicht** lassen sich Kunststoffe danach unterscheiden, ob sie unter- oder oberhalb ihrer Einfrieretemperatur, also im Glasbereich oder im elastischen Bereich verwendet werden. Baulager und Dichtungsbahnen z.B. erfordern zu ihrer Wirksamkeit eine große Verformbarkeit, Lichtkuppeln hingegen erfordern ein steifes Verhalten.

Tabelle 2: Glasübergang ausgewählter Kunststoffe

Kunststoff	Kurzbezeichnung	Glasübergang [°C]
Polyethylen (Polyethen)	PE	ca. -50
Polyisobutylen	PIB	-60 bis -75
Chloroprenkautschuk	CR	-40
Polytetrafluorethylen (Teflon)	PTFE	-20
Polyvinylchlorid	PVC-weich	-10 bis -100
Polypropylen	PP	ca. -35
Polyamid	PA 6	40
Polyvinylchlorid	PVC	65 bis 75
Polystyrol	PS	80 bis 100
Acrylglas	PMMA	90 bis 110
Polycarbonat	PC	150

Aus **thermischer Sicht** lassen sich Kunststoffe danach unterscheiden, ob sie in der Wärme formbar und ffügbar sind oder nicht, ob ihre Struktur also aus linearen oder vernetzten Molekülketten besteht. Kunststoffe mit linearen Ketten können wiederholt aufgeschmolzen werden.

Vernetzte Kunststoffe können sich auch bei nur geringer Vernetzung nicht mehr verflüssigen sondern nur noch zersetzen.

Kunststoffe können auch im Hinblick auf ihren Anwendungsbereich nach ihrer Temperaturbeständigkeit unterteilt werden.

- Hochtemperaturkunststoffe weisen eine Dauergebrauchstemperatur von über 150 °C auf und haben ein hohes thermisch-mechanisches Eigenschaftsniveau. Für höchste Anwendungstemperaturen geeignete Kunststoffe (Polyimid (PI), Polybenzimidazol (PBI), PTFE) sind nicht schmelztechnisch verarbeitbar. Die Herstellung von Teilen erfolgt durch Sintern.
- Konstruktionskunststoffe sind dauerhaft bei Temperaturen zwischen 100 °C und 150 °C einzusetzen. Sie weisen gute mechanische Eigenschaften und eine gute Chemikalienbeständigkeit auf.
- Standardkunststoffe können bei Temperaturen unter 100 °C dauerhaft eingesetzt werden.

Die in Bild 33 dargestellte Kunststoffpyramide zeigt auf Basis der genannten Kriterien eine detaillierte Übersicht über die Temperaturbeständigkeit thermoplastischer Kunststoffe.

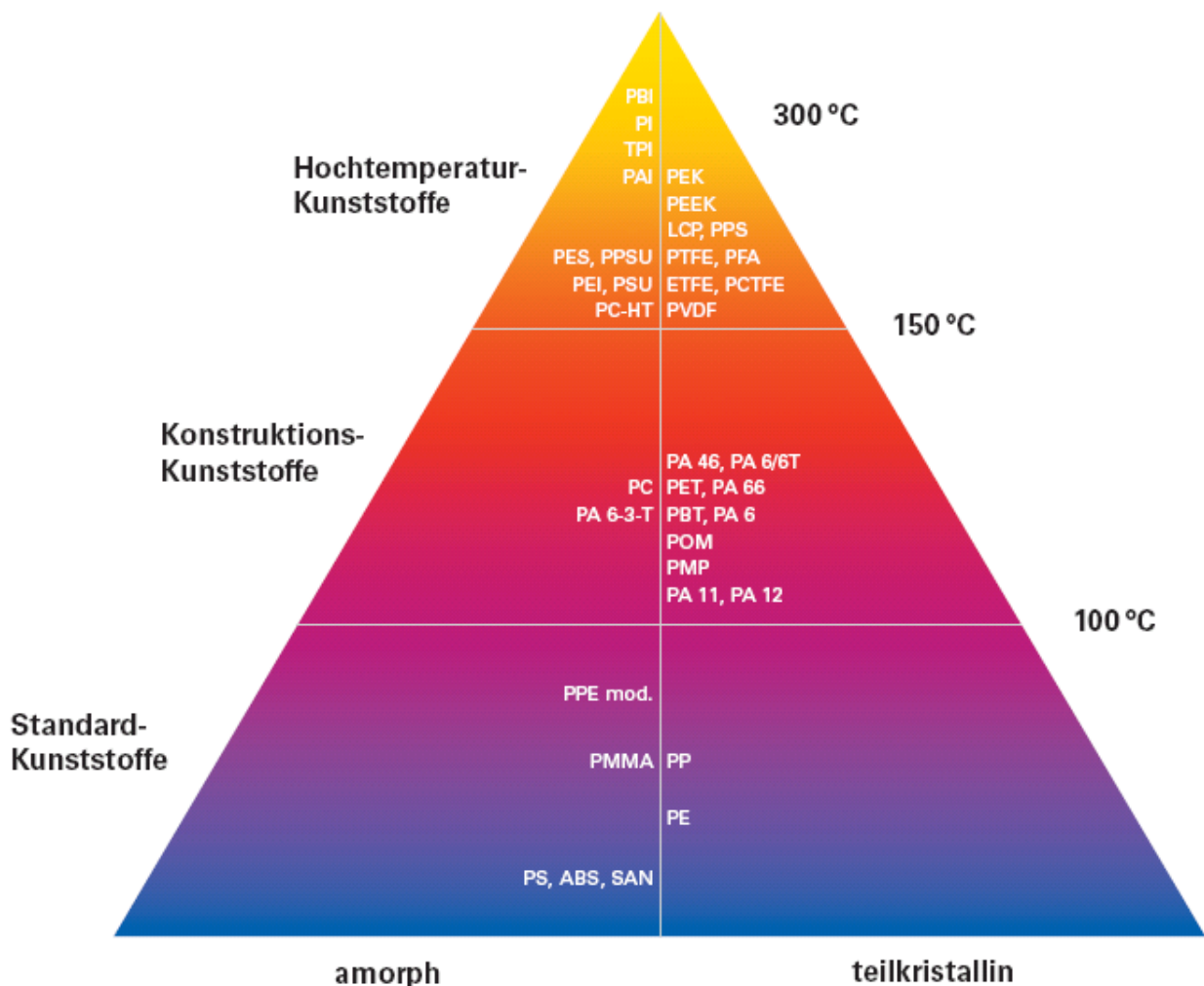


Bild 33: Differenzierung thermoplastischer Kunststoffe aufgrund ihrer Temperaturbeständigkeit [Lit 5]

3.6 Weitere Einflüsse auf das Verhalten der Kunststoffe

Der **chemische Aufbau** der Kunststoffe ist bestimmend für:

- Dichte
- Chemische Beständigkeit
- Elektrisches Isoliervermögen
- Wärmeempfindlichkeit

Der **Vernetzungsgrad** und damit das mechanische Verhalten kann auch bei vergleichbarer chemischer Zusammensetzung unterschiedlich sein. Thermoplaste sind i. d. R. nicht vernetzt.

Acrylharz	Thermoplast / Thermoelast
Polyester	Thermoplast (gesättigt) / Duroplast (ungesättigt)
Polyurethan	Thermoplast / Elastomer / Duroplast
Silikon	Fluid / Elastomer

Die **Gestalt, Größe und Anordnung der Makromoleküle** wirken sich aus auf:

- Einfrier- bzw. Schmelztemperatur
- Festigkeit und Zähigkeit
- Quellbarkeit und Löslichkeit beim Eindringen kleinerer Moleküle (Lösungsmittel) zwischen die Ketten

4 Verarbeitung und Lieferformen

4.1 Hilfs- und Zusatzstoffe

Die Grundsubstanzen der Kunststoffe werden von wenigen Chemiefirmen erzeugt. Formulierer und Konfektionierer stellen aus Grundsubstanzen die verarbeitungsfähigen Produkte her. Dabei werden Hilfs- und Zusatzstoffe verwendet.

4.1.1 Weichmacher

Weichmacher sind schwer flüchtige Flüssigkeiten, deren Moleküle durch Nebenvalenzen an die Kunststoffmoleküle gebunden werden. Sie verringern die Wechselwirkungskräfte zwischen den Makromolekülen, setzen dadurch die Erweichungstemperatur und somit die Sprödigkeit und Härte der Kunststoffe herab [Lit 9]. Harte Thermoplaste können durch Zusatz niedermolekularer Produkte (äußere Weichmacher) oder durch Anregung zur Ausbildung kurzer Seitenketten (innere Weichmacher) so modifiziert werden, dass ihr Glasübergangsbereich zu tiefen Temperaturen (unterhalb der Gebrauchstemperatur) verschoben wird.

Als Weichmacher dienen hochsiedende Ester der Phthalsäure, Phosphorsäure usw., z.B. Dioctylphthalat, Trichlorethylphosphat.

4.1.2 Lösungsmittel

So werden Flüssigkeiten bezeichnet, die einen relativ niedrigen Siedepunkt besitzen und andere Stoffe erweichen oder ganz auflösen können, ohne diese chemisch zu verändern. Bei geringen Schichtdicken verdunsten sie wieder aus der Lösung.

4.1.3 Farbstoffe

Kunststoffe werden im Allgemeinen mit anorganischen Pigmenten oder solchen organischen Farbstoffen, die sich durch eine hohe chemische und thermische Beständigkeit auszeichnen, in der Masse vor der Polymerisation eingefärbt. Selten ist das Färben der Fertigerzeugnisse möglich (z.B. bei wasserquellbarem Material bzw. Fasern) [Lit 9].

4.1.4 Antistatika

Dies sind leitende Stoffe (z.B. Polyglycoether, quartäre Ammoniumverbindungen u.a.), die den Kunststoffen zugesetzt werden, damit sich diese nicht elektrostatisch aufladen.

4.1.5 Stabilisatoren [Lit 9]

Stabilisatoren sollen Kunststoffe vor Veränderung und Schäden infolge Sonneneinstrahlung schützen. Die energiereiche Strahlung (UV-Bereich) lässt Kunststoffe altern, d.h., sie bewirkt eine nicht umkehrbare Änderung, meist Verschlechterung, der Gebrauchseigenschaften. Die Wärmestrahlung (IR-Bereich) beschleunigt diesen Vorgang. Als Stabilisatoren werden u.a. Salze (Blei, Cadmium, Barium) und Ruß verwendet.

4.1.6 Flammenschutzmittel [Lit 9]

Diese Mittel setzen die Entflammbarkeit des Kunststoffes herab. Die Mittel wirken durch das Abschirmen des Sauerstoffs vom Brandherd, das Beeinflussen der Zersetzung des Kunststoffes oder des Verbrennungsmechanismus. Die gewünschte Wirkung wird durch Halogenverbindungen des Chlors und Broms erzielt, wobei die bromhaltigen Verbindungen eine überragende Bedeutung besitzen. Daneben werden auch Phosphorverbindungen und Aluminiumhydroxid sowie als synergetische Verstärkung zu den Halogenverbindungen Antimontrioxid eingesetzt.

4.1.7 Füllstoffe [Lit 9]

Als Füllstoffe kommen anorganische oder organische Zusätze in fester Form zum Einsatz, die sich in ihrer Zusammensetzung und Struktur vom Kunststoff wesentlich unterscheiden. Die Füllstoffmenge beträgt bei Thermoplasten 10 % bis 20 %; bei Duroplasten und Elastomeren bis 60 %.

Der Einsatz der Füllstoffe dient verschiedenen Zwecken.

- Durch inaktive Füllstoffe wie z.B. Gesteinsmehl, Papierfasern und Holzmehl können Kosten reduziert werden.
- Durch aktive Füllstoffe wie z.B. Ruß, gefällte Kieselsäure und Talkum können die mechanischen Kennwerte erhöht werden.

4.1.8 Treibmittel [Lit 9]

Treibmittel werden bei der Schaumstoffherstellung zugesetzt.

- Chemische Treibmittel: organische Verbindungen, die in der Hitze meist Stickstoff abspalten (Azo-Verbindungen oder Sulfo-Hydrazide).
- Physikalische Treibmittel: bei 25 °C bis 60 °C siedende Flüssigkeiten wie Halogenalkane (Frigen) oder Kohlenwasserstoffe (Pentan, Petrolether).
- permanente Gase (Begasung unter hohem Druck oder Schaumschlagen).

4.2 Herstellvorgang

4.2.1 Thermoplaste

Die Kunststoffindustrie polymerisiert die Thermoplaste und liefert sie anschließend als Granulat oder Pulver zu den verarbeitenden Betrieben. Dort werden sie mit Hilfsstoffen abgemischt und zu Fertigprodukten oder Halbzeugen weiterverarbeitet (Bild 34). Für Lacke, Klebstoffe und Betonzusätze kann das Polymerisat auch in organischen Lösungsmitteln gelöst oder in Wasser dispergiert werden und am Bauwerk durch Verdunsten physikalisch erhärten.

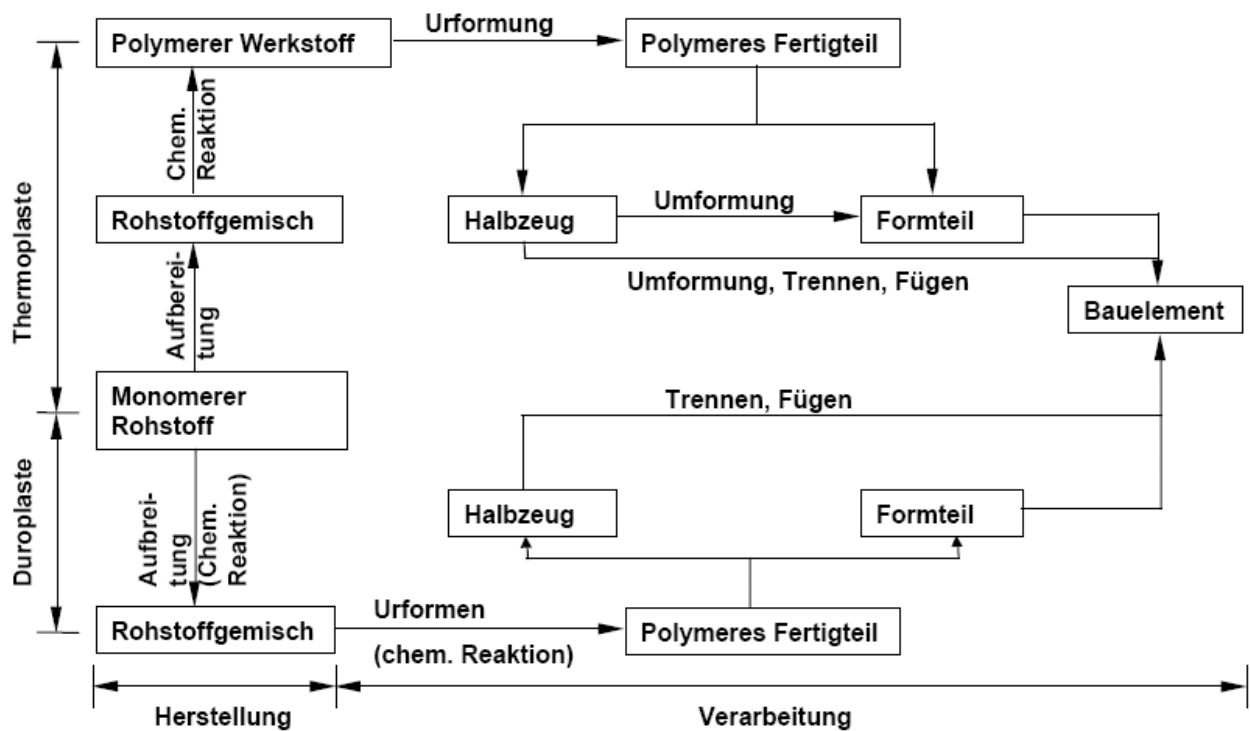


Bild 34: Herstellung und Verarbeitung von Kunststoffbauelementen [Lit 4]

4.2.2 Duroplaste

Bei diesen Kunststoffen darf die Vernetzung erst bei der endgültigen Formgebung stattfinden, da nach der Reaktion keine spannungslose Formgebung mehr möglich ist (Bild 34). Eine mögliche Vereinfachung besteht lediglich darin, dass teilweise vorpolymerisierte Molekülketten hergestellt werden, die dann im Bauteil in einem zweiten Reaktionsablauf vernetzen. Zur Vernetzung eines Duroplasten sind stets mehrere Grundsubstanzen erforderlich (Stammkomponente, Katalysator, Härter und Beschleuniger). Der Formulierer mischt diese Grundsubstanzen so, dass nur noch zwei Komponenten für das reaktionsfähige Gemisch erforderlich sind. Die unter normalen Temperaturverhältnissen meist flüssige oder zähflüssige, eventuell vorpolymerisierte Stammkomponente (A) wird üblicherweise als **Harz** (Reaktionsharz, Flüssigharz, Kunstharz) bezeichnet, während die Komponente (B), die pulverartig, pastös oder flüssig sein kann, als **Härter** bezeichnet wird. Der ausgehärtete, vernetzte Duroplast wird ebenfalls als Harz bezeichnet.

Die B-Komponente kann bei entsprechender Formulierung auch durch Stoffe gebildet werden, die in der Umwelt vorhanden sind, z. B. die Luftfeuchte.

4.2.3 Elastomere

Sie werden aus vernetzungsfähigen thermoplastischen Kautschukpolymeren vulkanisiert und als Fertigprodukt auf die Baustelle geliefert (z. B. Gummilager, Dichtungsbahnen o. Ä.).

Als **Vulkanisation** wurde ursprünglich das von C. N. Goodyear 1844 patentierte Verfahren bezeichnet, Kautschuk zusammen mit Schwefel zu erhitzen und so gegen chemische, atmosphärische und mechanische Einflüsse widerstandsfähiger zu machen. Dabei werden die Makromoleküle des Kautschuks mit Doppelbindungen mit Hilfe von Katalysatoren zur Reaktionsbeschleunigung (z. B.: Zinkoxid (ZnO) und 2-Mercaptobenzothiazol (MBT)) über Schwefelbrücken vernetzt (Bild 35), so dass die Moleküle sich nicht mehr frei gegeneinander bewegen können. Die plastischen Eigenschaften des Kautschuks gehen verloren und das

entstehende Gummi verhält sich elastisch. Bei Kautschuk ohne Doppelbindung (z. B. Silikonkautschuk) müssen Peroxide oder energiereiche Strahlung (γ -Strahlen) zum Vulkanisieren eingesetzt werden [Lit 2, Lit 14].

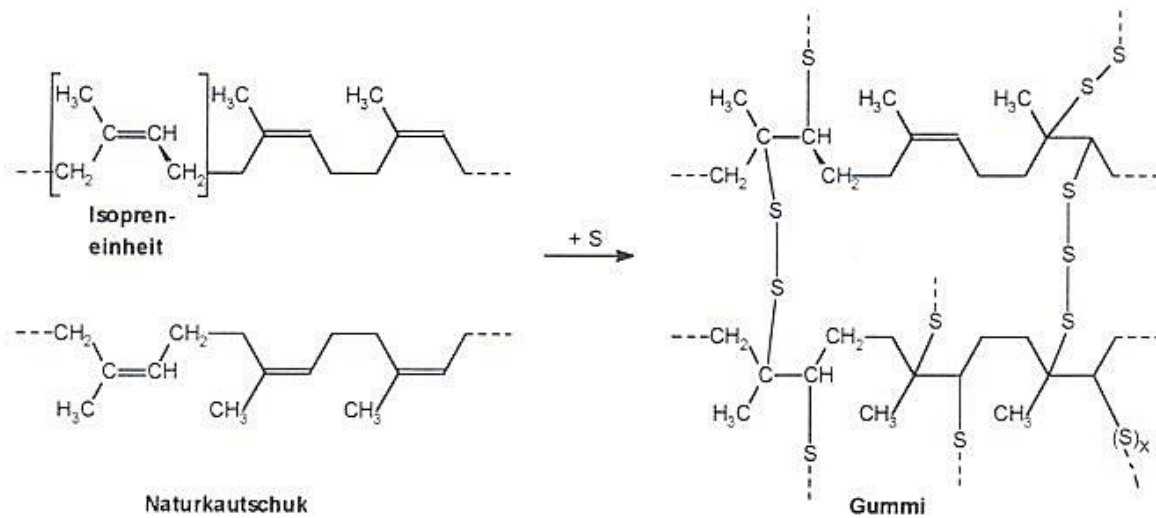


Bild 35: Vulkanisation von Naturkautschuk (bzw. Latex) zu Gummi [Lit 3]

4.3 Besondere Lieferformen

Kunststoffe können nicht nur aus gleichartigen Monomeren, sondern auch aus Mischungen hergestellt werden. Entsteht eine Mischung durch gemeinsame Polymerisation, so bezeichnet man sie als **Copolymer**. Eine Mischung mehrerer Thermoplaste nach der Polymerisation - vergleichbar einer Metalllegierung - wird Polyblend genannt (z. B. PVC – PE).

Die Möglichkeit der Mischung ist auch zwischen Kunststoffen und Naturstoffen (z. B. Teer-EP oder Ethylen-(Copolymerisat)-Bitumen ECB) gegeben. Diese Mischungen werden nur werkmäßig und nicht auf der Baustelle hergestellt.

Als **Pressmassen** bezeichnet man feste vorgeformte Mischungen aus Duroplasten und Zusatzstoffen. Man spricht von Verbundstoffen, wenn der Anteil an Feststoffen größer als der des Kunststoffes ist (z. B. faserverstärkte Kunststoffe).

Anstrich- und Klebstoffe haften filmbildend auf dem Untergrund. Ihre Werkstoffbasis sind sowohl Thermoplaste als auch elastomer-, oder duroplast- vernetzende Harze.

Thermoplaste werden als fertige Polymerisate thermisch aufgeschmolzen (Schmelzkleber, Farbsintern) und bilden den Film durch Abkühlen. Sie können aber auch in gelöster oder dispergierter Form durch Verdampfen des Lösungsmittels oder Wassers einen Film bilden. Kautschuk wird in Lösungsmitteln gelöst oder in Form wässriger Dispersionen (Latex) verarbeitet und vulkanisiert (vernetzt).

5 Kunststoffe im Bauwesen [Lit 8]

Tabelle 3: Richtwerte für die physikalische Eigenschaft einiger Baustoffe [Lit 7]

Kunststoffbezeichnung	Kurzbezeichnung	Dichte	Max. Gebrauchstemperatur	Wärmedehnzahl	Wärmeleitfähigkeit	Anhaltswerte bei Raumtemperatur			
						Zugfestigkeit	Druckfestigkeit	E-Modul	
		g/cm ³	°C	10 ⁻⁶ /K	W/(m K)	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	
Polyethylen	PE – HD	0,94 – 0,97	100 - 120	-	≤ 0,42	≤ 25	30	≤ 1000	
	PE - LD	0,91 – 0,93	85	200	≥ 0,32	≥ 11	-	≥ 200	
Polypropylen	PP	0,91	130	160	0,157	34	-	1400	
Polyisobutylen	PIB	0,93	60 - 120	Folien mit gummielastischem Verhalten				-	
Polyvinylchlorid	PVC - U	1,39	60	80	0,157	45 – 60	80	3000	
	PVC - P	1,20 – 1,39	55	200	0,163 – 0,233	13 – 30	-	30	
Polymethylacrylat	PMMA	1,2	75	80	0,174	74	120	3000	
Polysterol	PS	Hart	1,06	50 - 70	70	0,203	55	100	3200
		Schaum	0,015 – 0,065	79 - 90	-	0,031	0,2 – 1,3	0,08 – 0,05	-
Polytetrafluorethylen	PTFE	2,2	250	70 - 180	0,233	13 – 27	-	400	
Polyamid	PA	1,1	80	90	0,302	35 – 75	-	2000	
Ungesättigtes Polyester	UP ¹	1,2	Bis 120	140	0,63	40 – 80	120 - 190	4000	
Epoxidharz	EP ²	1,3	Bis 200	75	-	40 - 80	90 - 170	4000	
Polyurethan	PUR	Hart	1,2	100	160	0,35	20 - 56	-	900
		Schaum	0,032 – 0,3	80 - 120	-	0,026 – 0,037	0,2 – 2,0	1,2 – 7,0	-
Silikone	Si	1,25	200	-	-	1,5	Si -Kautschuk		
Melaminharz	MF	1,5 – 2,0	100	55	0,465	15 - 55		5000 – 12000	
Phenolharz	PF, Pressmasse	1,4 – 2,0	100 - 150	15 - 50	0,523	15 - 45		4000 - 15000	
Zum Vergleich	Beton	2,1 – 2,4	250 - 1000	5 - 14	2,1	0,7 – 4,0	10 - 55	22000 – 39000	
	Stahl	7,8	200 - 500	10 - 17	60	370 -1800		210000	

¹ ohne mechanische Beanspruchung

² unverstärkt

5.1 Thermoplaste

5.1.1 Polyethylen (PE)

PE-LD (low density) entsteht bei hohem Druck während der Polymerisation. Es hat geringe Dichte ($\rho < 0,93 \text{ g/cm}^3$) und einen Kristallitschmelzpunkt von rd. $110 \text{ }^\circ\text{C}$. PE-HD (high density) entsteht bei niederem Druck. Es hat eine höhere Dichte ($\rho > 0,94 \text{ g/cm}^3$) als PE-LD und einen Kristallitschmelzpunkt von etwa $130 \text{ }^\circ\text{C}$.

PE gehört wie das Polypropylen zur Gruppe der Polyolefine.

Verwendung: Folien, Bahnen, Vliese, Behälter, Rohre, Profile, Halbzeuge, Umhüllung von Spannstahl ohne Verbund

5.1.2 Polypropylen (PP)

Bei der Polymerisation von PP ist die Kristallitbildung besonders gut steuerbar, sodass hohe Erweichungspunkte bis $165 \text{ }^\circ\text{C}$ und gute Festigkeitseigenschaften erreicht werden können. PP hat eine höhere Härte als PE. Beide sind praktisch nicht verklebbar. PP ist warmstandfest, in der Kälte aber relativ versprödungsgefährdet. Copolymerisation mit Ethylen verbessert das Kälteverhalten.

Verwendung: Rohre, Formteile, Folien, Seile, Behälter, Halbzeuge, Vliese, Geotextile.

5.1.3 Polyisobutylen (PIB)

Polyisobutylen ist je nach Polymerisationsgrad ölig bis gummiartig (thermoelastisch). Es ist frei von Weichmachern und hat im Temperaturbereich $-50 \text{ }^\circ\text{C} \leq T \leq 100 \text{ }^\circ\text{C}$ relativ konstante Eigenschaften. Außer durch Schmelzschweißen kann es durch Lösungsmittel (Quellschweißen) gefügt werden. Füllstoffe erhöhen Festigkeit und Härte.

Verwendung: niedermolekulares PIB für Fugenmassen und Klebstoffe, hochmolekulares PIB für Folien und Dichtungsbahnen

5.1.4 Polyvinylchlorid (PVC)

In nicht weichgemachter Form ist PVC hart, zäh und abriebfest (PVC-U, früher Hart-PVC). Es erreicht den Glasübergang bei circa $75 \text{ }^\circ\text{C}$.

Durch den Einbau von 10 bis 60 % Weichmacher wird PVC-P (früher: Weich-PVC) erzeugt. Sein Glasübergang liegt deutlich unter dem Gefrierpunkt. Es hat eine hohe Dämpfung und Kriechneigung. Nachteilig ist, dass die Weichmacher verseifen, ausdiffundieren und bei Berührung mit anderen Thermoplasten in diese abwandern können.

Verwendung: PVC-U für Rohre, Formteile, Fassadenverkleidungen. Erhöht schlagfestes PVC (Polyblend mit PE) für Fenster- und Türprofile, Dachentwässerung, Rollläden. PVC-P für Schläuche, Folien, Dichtungsbahnen und -profile, Bodenbeläge, Elektroisolation, Schaumstoffe.

Brandverhalten: PVC-U ist schwer entflammbar und brennt nur in der Flamme. PVC-P brennt nach Entzündung weiter. Über $150 \text{ }^\circ\text{C}$ beginnt die Abspaltung von HCl (Salzsäure), sodass bei Kontakt mit Stahl Lochfraßkorrosion auftreten kann. Nach PVC-Bränden ist auf eine mögliche spätere Korrosion der Bewehrung im Beton zu achten. Die Brandgase sind gesundheitsschädlich.

5.1.5 Polymethylmethacrylat (PMMA)

Acrylglas ist nur etwa halb so schwer wie Silikatglas aber nicht kratzfest. Seine Neigung in der Kälte zu verspröden ist gering. PMMA ist relativ alterungsbeständig. Durch Recken bei der Warmformgebung können seine mechanisch-thermischen Eigenschaften günstig beeinflusst werden.

Verwendung: Platten, (z.B. Münchner Olympiazeltdach), Profile und Formteile wie z.B. Lichtkuppeln, Rohre

5.1.6 Polyvinylacetat (PVAC)

Polyvinylacetat erweicht je nach Polymerisationsgrad bereits ab 30 °C und hat ein großes Klebvermögen.

Verwendung: Bindemittel für Anstriche und Beschichtungen (Dispersionsfarben, Binderfarben); Herstellung von Lacken, Klebstoffen und Spachtelmassen.

5.1.7 Polystyrol (PS)

Polystyrol ist ein bis etwa 70 °C wärmebeständiges Polymer. Bei Herstellung von Guss- oder Pressteilen kann eine brillante Oberfläche erzeugt werden.

Verwendung: Schaumstoff für Dämm- und Schalungszwecke. Treibmittelhaltige PS-Granulate werden mit Wasserdampf unter Druck und Hitze zu Blöcken, Platten und Formteilen aufgeschäumt (Partikelschaum (EPS)). PS kann auch aus der Schmelze aufgeschäumt werden (Extruderschaum (XPS)).

5.1.8 Polytetrafluorethylen (PTFE) (z. B. Teflon)

Die hervorragende thermische und chemische Beständigkeit ist auf die sehr feste Bindung zwischen Kohlenstoff und Fluor und den hohen Kristallisationsgrad zurückzuführen. PTFE ist bis +327 °C temperaturbeständig. Zwischen -90 und 250 °C sind seine mechanischen und chemischen Eigenschaften praktisch unverändert. PTFE kann nicht durch Schmelzen weiterverarbeitet (Schmelz- und Zersetzungstemperatur liegen zu dicht beisammen) und nicht geklebt werden, spanabhebende Bearbeitung ist eingeschränkt möglich. Es ist sehr zäh und besitzt zu Stahl eine extrem niedrige Reibungszahl (μ ca. 0,01).

Verwendung: Gleitlager für Brücken, als Trennmittel

5.1.9 Polyamide (PA) (z. B. Nylon)

Polyamide werden durch Polykondensation gewonnen. Wie alle Polykondensate nehmen PA je nach Sorte mehr oder minder stark Wasser auf. Sie quellen dabei und verändern ihre mechanischen Eigenschaften.

Polyamide können teilkristallin eingestellt werden. Die mechanischen Eigenschaften reichen so von zäh und weich bis hart, reißfest und abriebfest. PA ist relativ wärmebeständig (+100 °C). Die Festigkeit kann durch Recken um den Faktor 5 gesteigert werden.

Verwendung: Fasern z.B. für Seile und Geotextilien, Dübel

5.1.10 Polycarbonat (PC)

Polycarbonat ist ein glasklares, hart elastisches Polykondensat. Zwischen -100 °C und +100 °C ist es schlagzäh bzw. wärmebeständig.

Verwendung: Scheiben (auch schusssicher), Lichtkuppeln, durchsichtige Gehäuse, CD, DVD

5.1.11 Polyurethane (PUR)

Unvernetzte (**lineare**) Polyurethane werden für besonders dehnbare Fasern verwendet. Diese erreichen bei einem Gehalt von mindestens 85 % PU eine Dehnbarkeit zwischen 500 und 800 % [Lit 14].

5.1.12 Polyester

Gesättigte Polyester werden für Fasern, Vliese (in Bitumenbahnen und Geotextilien), Gewebe und Seile verwendet.

5.2 Duroplaste

5.2.1 Ungesättigte Polyesterharze (UP)

Ungesättigte Polyesterharze kommen in Styrol gelöst zum Anwender und vernetzen nach dem Vermischen mit einem Härter. Das Aushärten ist mit Schrumpfen bis zu ca 10 % verbunden, die Verwendung von Reinharzen in größerer Schichtdicke wird dadurch uninteressant.

Verwendung: als Anstrich- und Klebstoff, als Bindemittel in faserverstärkten Kunststoffen z.B. in Kombination mit Glasfasern (GFK) für Lichtkuppeln, Fassadenelemente, Silos, als Bindemittel für feuergetrocknete mineralische Gesteinskörnung (Polyesterbeton).

5.2.2 Methacrylharze (MMA)

Methacrylharze sind hinsichtlich Herstellungsprozess, Handelsform und Verarbeitung dem UP vergleichbar. Auch hier wird ein hochmolekulares Vorprodukt - gelöst als Reaktionsharz - an den Verwender geliefert und durch Polymerisation in den endgültigen festen Zustand überführt (siehe Kapitel 5.1.5).

5.2.3 Epoxidharze (EP)

Epoxidharze erhärten durch Polyaddition mit nur geringem Volumenschrumpfen. EP ist beständiger als UP, insbesondere im alkalischen Milieu (Betonbau). Seine Herstellungskosten sind aber mindestens doppelt so hoch.

Verwendung: als Anstrich, Beschichtung und Klebstoff, bevorzugtes Bindemittel für Reparaturmörtel

5.2.4 Polyurethanharz (PUR)

Polyurethanharze **vernetzen** durch Polyaddition und können mit verschiedenen Molekülstrukturen hergestellt werden. Die Eigenschaften reichen von gummielastisch bis hartspröde. Bei Wasserzutritt während der Reaktion wird CO₂ abgespalten, sodass das Reaktionsprodukt aufschäumt.

Einkomponenten-PUR härtet mit Luftfeuchte als Reaktionspartner aus. Es wird z. B. für Fugenmassen und schnell härtende Kleber (Sekundenkleber) verwendet.

Verwendung: Gießharz, Hart- und Weichschäume, Ortschaum bei Montage von Ausbauteilen, Fugenmassen, Beschichtungen, Lacke

5.2.5 Aminoplaste (UF/MF)

Harnstoffformaldehydharz (UF) und Melaminharz (MF) sind beständig gegen UV-Strahlung, aber relativ empfindlich gegen IR-Strahlung und Feuchte (UF).

Verwendung: Leim, Ortschaum, Formteile (z.B. Platten)

5.2.6 Phenolharze (PF)

Phenolharze sind mit und ohne Füllstoffe gut spanabhebend zu bearbeiten (z. B. Spanplatten).

Verwendung: ähnlich UF, MF,

5.3 Elastomere

Elastomere entstehen durch vulkanisieren aus Kautschuk.

5.3.1 Chloroprenkautschuk (CR)

Das Elastomer Chloroprenkautschuk ist sehr alterungsbeständig (Markenname: z. B. Neoprene).

Verwendung: unbewehrte und stahlbewehrte Baulager, Fugenbänder, Einsatzbereich bei Temperaturen zwischen -30 °C und $+70\text{ °C}$ in allen Bereichen des Bauwesens

5.3.2 Ethylen - Propylen (-Dien-) - Terpolymer-Kautschuk (EPDM)

Die Kurzzeiteigenschaften des Elastomers entsprechen denen des CR, es kostet nur etwa halb so viel, hat aber unter höheren Spannungen merklich schlechtere Dauerstandseigenschaften. Es lässt sich kaum an Stahlbauteile anvulkanisieren.

Verwendung: unbewehrte Lager, Fugenbänder und Bahnen.

5.3.3 Siliconkautschuk (SIR)

Silicium ist wie Kohlenstoff vierwertig. Es kann über Sauerstoffbrücken polymerisiert werden. Die Seitenvalenzen des Siliciums sind mit organischen Resten besetzt. Je nach Art der Ausgangsstoffe, Besetzung der Seitenvalenzen, Polymerisations- und vernetzungsgrad, können ölige, pastenartige oder kautschukartige Silicone hergestellt werden. Die Vulkanisate zeichnen sich aus durch geringe Änderung der Eigenschaften über einen Bereich von -50 °C bis $+180\text{ °C}$, das hydrophobe Verhalten und die gute chemische Beständigkeit. Sie haben gegen Stahl eine niedrige Reibung.

Verwendung: Dichtungen, Transportbänder, Elektroisolation, Fugenmassen.

5.3.4 Polyurethan (PUR)

Vgl. Kapitel 5.2.4.

5.3.5 Polysulfid

Polysulfid ist ein Kautschuk auf Schwefelbasis z. B. für Fugenmassen, (Firmenbezeichnung: Thiokol)

6 Eigenschaften und Prüfung von Kunststoffen

Kunststoffe haben ein **viskoelastisches** Verformungsverhalten, welches von der Temperatur sowie der Beanspruchungsgeschwindigkeit und Beanspruchungsdauer abhängig ist. Temperatur- und Umwelteinwirkung verändern die Eigenschaft durch Altern.

Im **Druck-, Zug- und Biegeversuch** werden immer Last und Verformung gemessen:

Die Proben sollen unabhängig vom Ausmaß der Verformung (Duroplaste: 1 mm/m, Elastomere 10000 mm/m) in ca. 1 min versagen.

Schlagversuche dienen zur Beurteilung der Schlagzähigkeit. Bei Folien als Durchstoßversuch.

Einreiß-/Weiterreißversuche werden bei Bahnen durchgeführt.

Oberflächenhärte: Bei Thermoplasten und Duroplasten misst man mit Kugeleindruck, bei Elastomeren bzw. weichgemachten Kunststoffen misst man mit Nadeleindruck (Shore-Härte). Die Härte ist ein Anhaltswert für den Verformungsmodul.

6.1 Einfluss von Belastungsgeschwindigkeit und Temperatur auf das Kurzzeitverhalten

Der Zugversuch nach DIN EN ISO 527 dient der Beurteilung des Verhaltens von Kunststoffen bei kurzzeitiger, einachsiger Beanspruchung. Wichtig für die Auswahl eines Kunststoffs sind neben dem Verhalten bei Spannung und Dehnung auch die Temperatur und die Zeit der Belastung. Bild 36 zeigt typische Spannungs-Dehnungs-Linien für verschieden Kunststoffe.

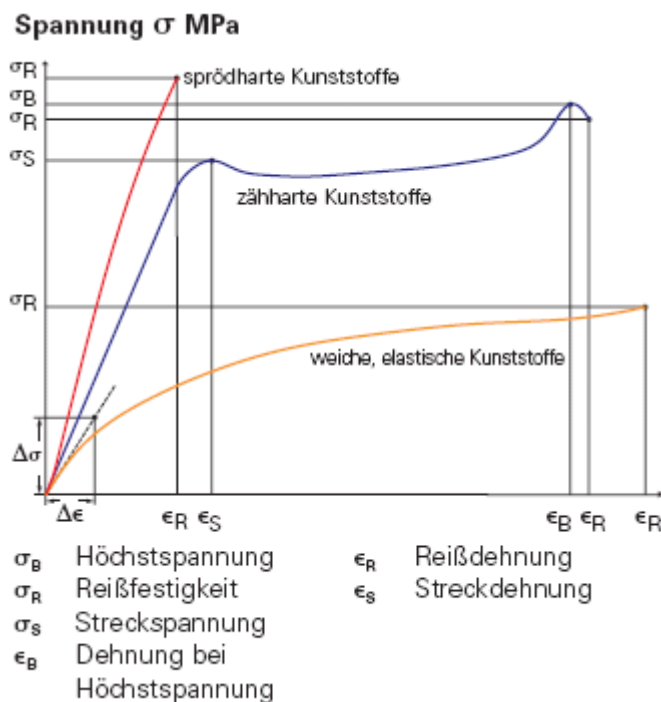


Bild 36: Mechanische Kennwerte im Zugversuch [Lit 5]

Einige unvernetzte Thermoplaste haben ähnlich wie warm gewalzter Stahl einen Fließbereich (Bild 36). Bei der Fließspannung orientieren sich die Molekülketten des Polymers, sodass es bei nochmaliger Belastung einem teilkristallinen Kunststoff ähnlich wird. Ein Kunststoff mit dieser Eigenschaft (z. B. PMMA) lässt sich durch Recken in eine oder zwei Richtungen wärmerestabiler und steifer machen. Durch Erwärmen kann die mechanisch aufgebrachte Dehnung wieder rückgängig gemacht werden (z. B. Schrumpffolie).

Wie Bild 37 zeigt, führt eine Verringerung der Belastungsgeschwindigkeit zu ähnlich niedrigen Verformungsmodulen und großen Bruchdehnungen wie eine erhöhte Temperatur.

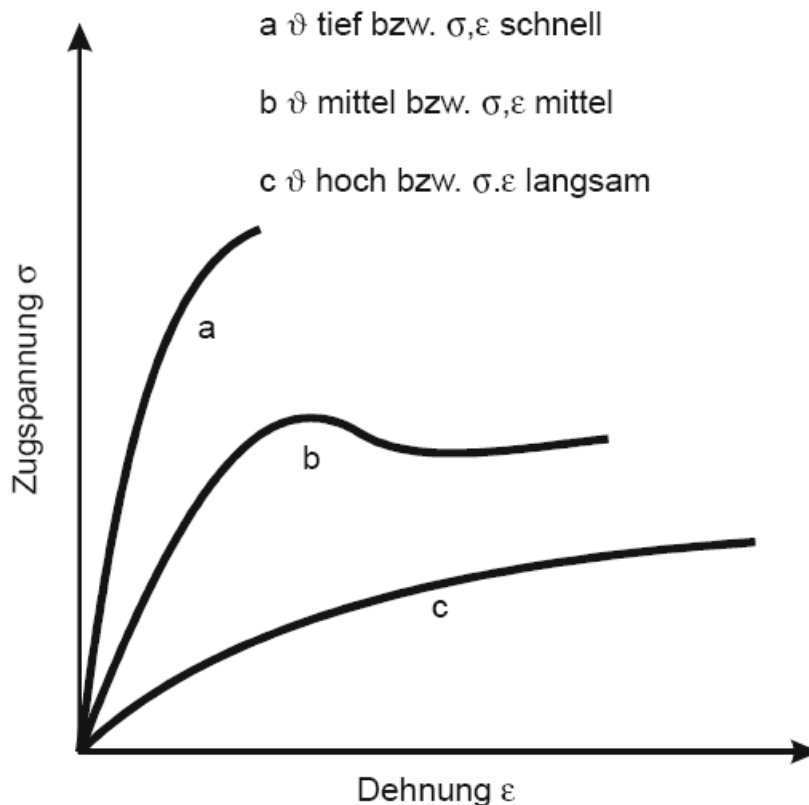


Bild 37: Einfluss der Temperatur bzw. der Belastungs- oder Dehngeschwindigkeit auf die Spannungs-Dehnungs-Linien eines Kunststoffs [Lit 10]

Kunststoffe werden meist bei 23 °C / 50 % r. F. untersucht. Mit höherer Temperatur sinkt bei Thermoplasten und Duroplasten bereits unter kurzzeitig wirkenden Lasten die Festigkeit (vgl. Bild 38), die Dehnung nimmt zu, obgleich die Kunststoffe sich immer noch im Glaszustand befinden. Bei Einwirkung hoher Temperaturen (im Glaszustand und darüber) sind die Festigkeiten sehr niedrig.

Die linearen Temperaturdehnzahlen liegen zwischen ca. 0,03 und 0,23 mm/(m·K). Sie sind damit 3 bis 20 mal höher als bei Stahl oder Beton.

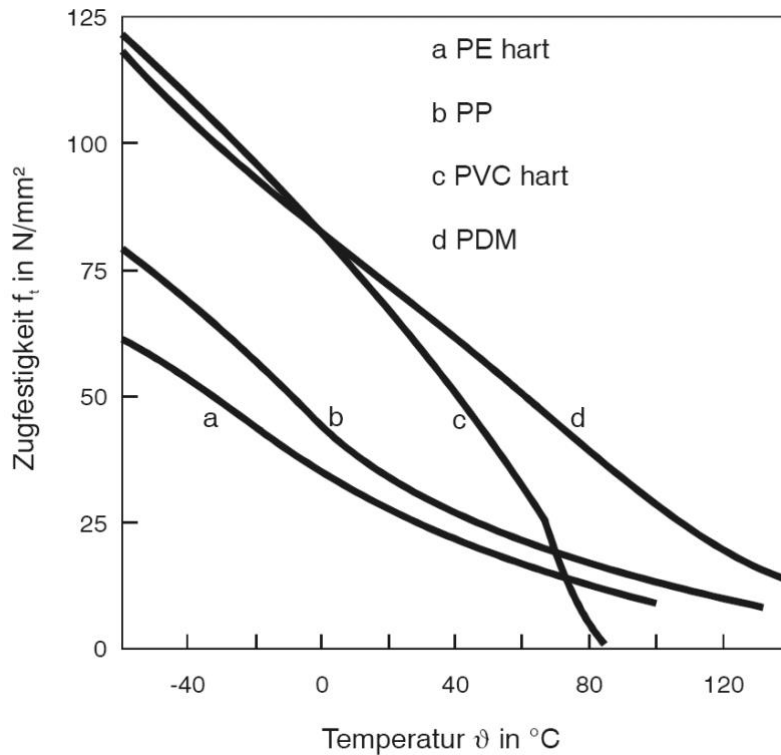


Bild 38: Kurzzeitfestigkeit einiger Thermoplaste in Abhängigkeit von der Temperatur [Lit 10]

6.2 Rheologisches Verhalten

6.2.1 Kurzzeitverhalten

Dynamischer Schubmodul: Er wird im Torsionsschwingungsversuch nach DIN EN ISO 6721 bestimmt (Bild 39). Eine kleine Kunststoffprobe wird mit einer Torsionsschwingung belastet. Die Dämpfung der Schwingung wird bestimmt. Die Probe befindet sich dabei in einer Temperierkammer, deren Temperatur in Stufen verändert wird.

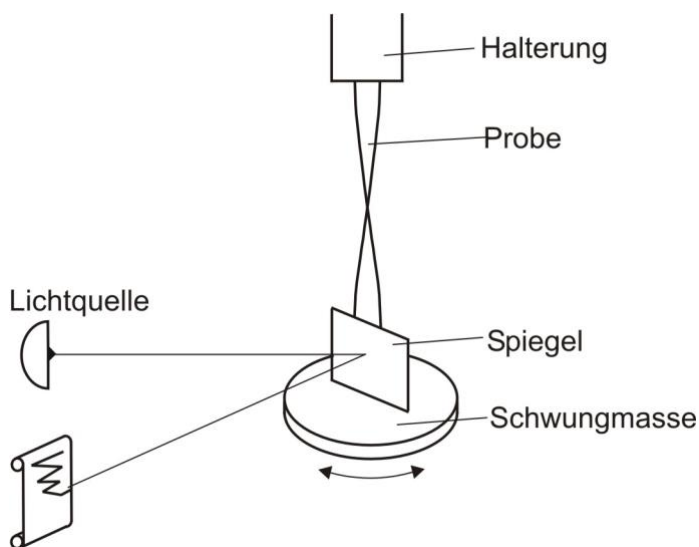


Bild 39: Torsionsschwingungsversuch (schematisch)

Aus der Dämpfung der Schwingung lässt sich der Torsions- oder Schubmodul G errechnen. Der dynamisch bestimmte Modul ist immer größer als der im Kurzzeitbereich statisch

bestimmte Wert, weil die Verformungsgeschwindigkeiten (Frequenz 2 bis 10 Hz) verhältnismäßig hoch sind. Der Schubmodul ist für die Kennzeichnung und zum Vergleich verschiedener Polymere gut geeignet (vgl. Bild 32).

Der E-Modul kann aus dem Schubmodul errechnet werden:

$$E = 2 \cdot G (1 + \mu); \mu = \text{Querdehnzahl}$$

Bei weichen Kunststoffen, oberhalb des Glasübergangs und bei Elastomeren ist μ annähernd 0,5, unterhalb des Glasübergangs etwa 0,35.

6.2.2 Langzeitverhalten

Viskoelastische Stoffe kriechen unter Dauerlast und brechen in einer endlichen Zeit, wenn die Dauerlast zu hoch ist. Die Kurzzeitfestigkeit ist größer als die Zeitstandfestigkeit und diese wiederum ist größer als die Dauerstandfestigkeit. Der viskose Anteil der Verformung ist bei thermoelastischen Kunststoffen sehr stark ausgeprägt. Schon bei geringer Spannung treten deutliche Kriechverformungen bestehend aus viskosen und viskoelastischen Anteilen auf.

Bild 40 und Bild 41 zeigen Zeitdehnlängen eines Thermoplasten in doppelt logarithmischer Darstellung. Die Parameter der Kurvenscharen sind Temperatur bzw. Spannung. Ab einem bestimmten Wert nehmen die zeitabhängigen Verformungen rapide zu und führen nach kurzer Zeit zum Bruch.

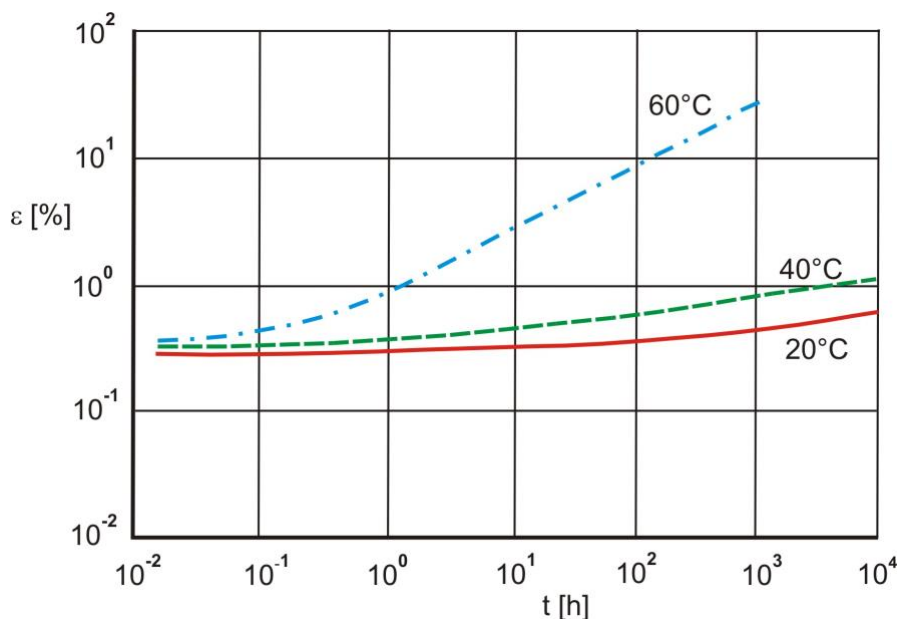


Bild 40: Zeitdehnlängen eines Thermoplasten bei $\sigma = 10 \text{ N/mm}^2$ und unterschiedlichen Temperaturen

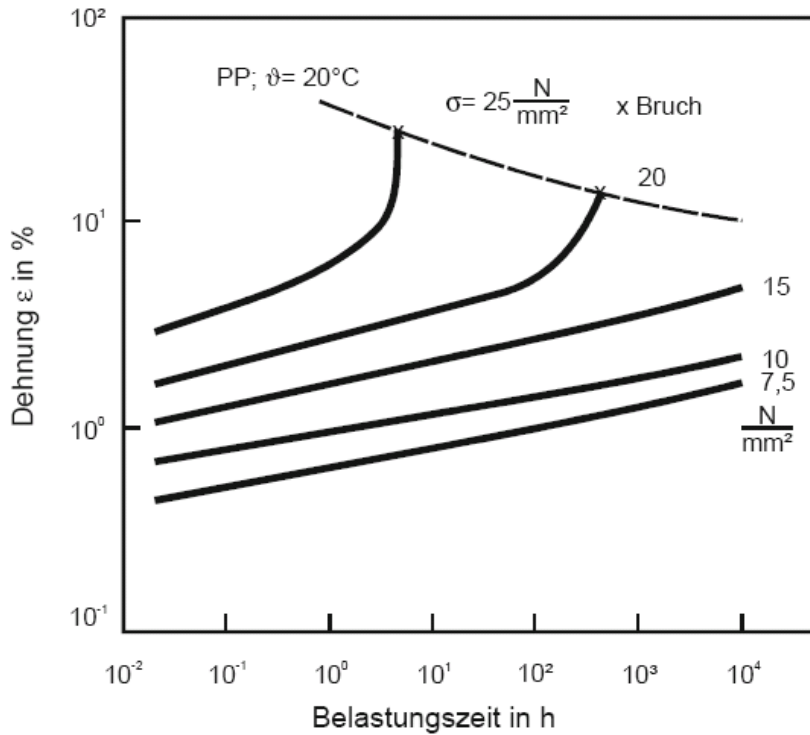


Bild 41: Zeitdehnlinien von PP [Lit 10]

Trägt man verschiedene Zeitstandfestigkeiten in Abhängigkeit von Standzeit und Prüftemperatur auf, so erhält man eine Schar affiner Kurven (Bild 42).

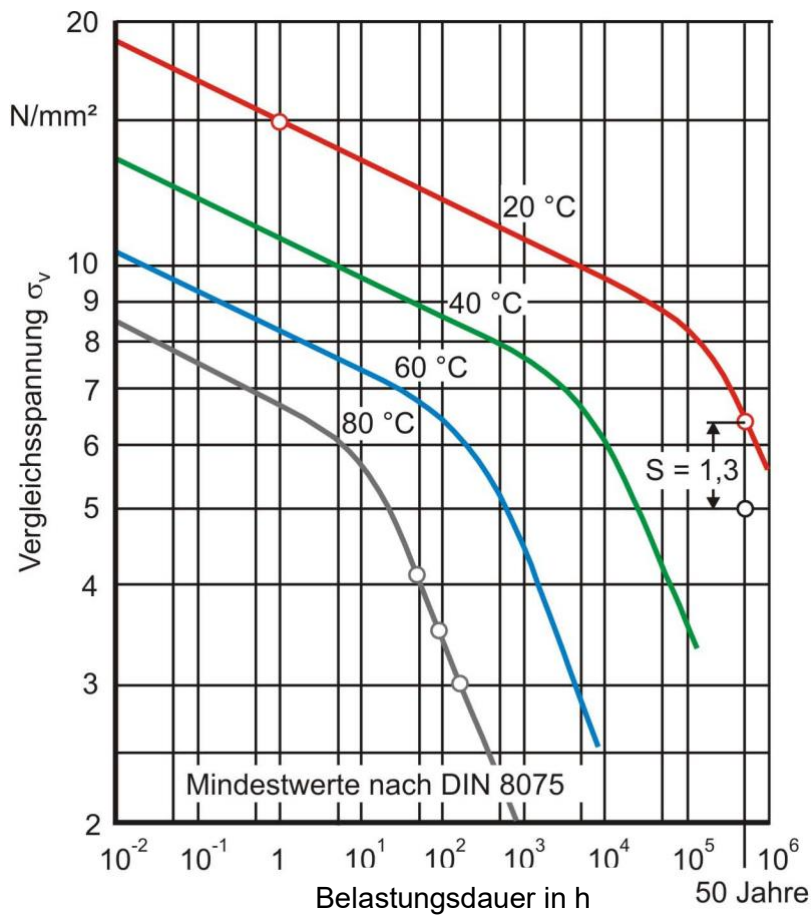


Bild 42: Zeitstandfestigkeit von Rohren aus PE-HD [Lit 10]

Diesen offensichtlichen Zusammenhang macht man sich zunutze, um die Tragfähigkeit von Bauteilen aus neu entwickelten Stoffen abzuschätzen: Aus nur kurze Zeit dauernden Versuchen bei hoher Temperatur wird dabei auf die Zeitstandfestigkeit bei niedrigeren Temperaturen geschlossen. Das Vorgehen wird für die PE-Rohre anhand von Bild 42 erläutert.

Zum Beispiel wird bei $\sigma = 4 \text{ N/mm}^2$ und $T = 80 \text{ °C}$ eine Standzeit von 50 h ermittelt, bei $\sigma = 3 \text{ N/mm}^2$ und $T = 80 \text{ °C}$ betrage sie 200 h und bei $\sigma = 15 \text{ N/mm}^2$ und $T = 20 \text{ °C}$ betrage sie 1 h. Durch Eintragen der Werte in das Diagramm und Ergänzen der Kurven lässt sich dann angenähert voraussagen, dass bei $T = 20 \text{ °C}$ und einer geforderten Standzeit von ca. 50 Jahren eine Spannung $\sigma = 6,5 \text{ N/mm}^2$ aufgebracht werden darf. Beträgt σ nur 5 N/mm^2 , so beinhaltet diese Extrapolation noch einen theoretischen Sicherheitsbeiwert von $\nu = 1,3$. Die Kurzzeitfestigkeiten bei verschiedenen Temperaturen müssen für diese Extrapolation bekannt sein.

Durch das Füllen der Kunststoffe, z.B. mit Gesteinsmehl oder Sand (vgl. Kapitel 4.1.7), werden bei Druckbelastung die Zeitstandfestigkeit erhöht und das Kriechen vermindert. Die Zugfestigkeit wird durch das Füllen vermindert.

6.2.3 Dauerschwingverhalten

Die Wöhlerkurve nähert sich bei Kunststoffen keiner eindeutigen Asymptote an, d. h., die Schwingfestigkeit nimmt auch nach hohen Lastwechselzahlen noch weiter ab (Bild 43 und Bild 44). Eine echte Dauerschwingfestigkeit liegt damit nicht vor.

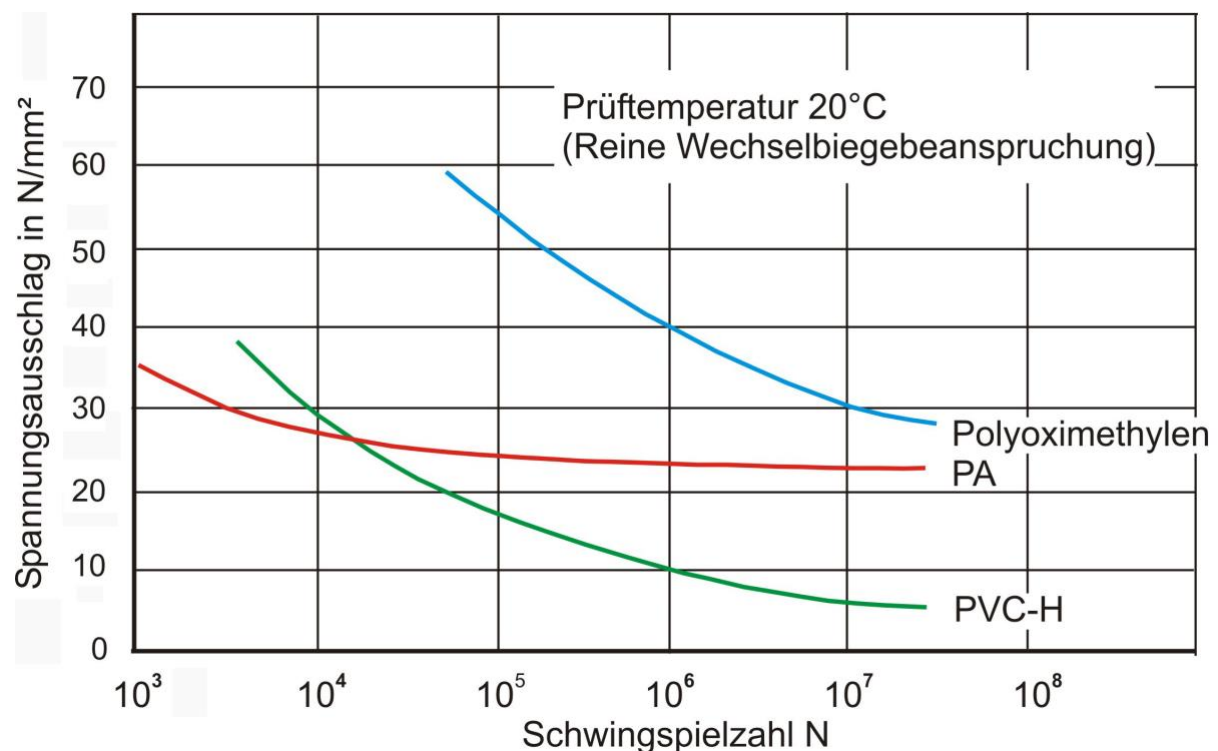


Bild 43: Wöhlerkurven von Thermoplasten

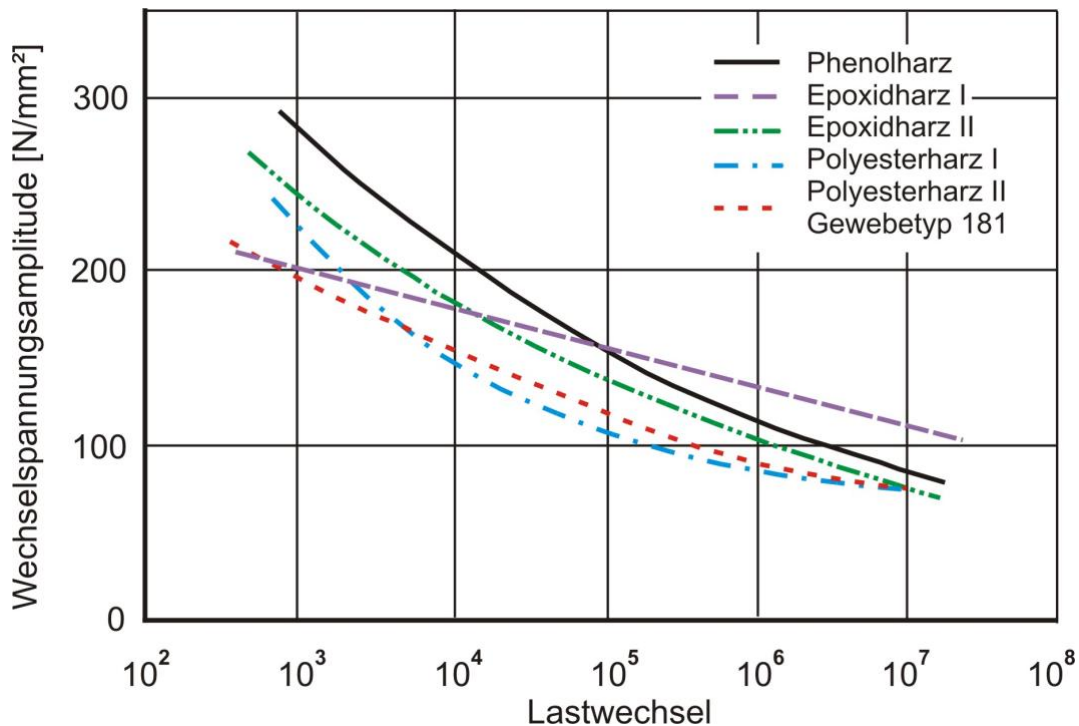


Bild 44: Wöhlerkurven von Glasfaserverstärkten Kunststoffen (GFK)

Wichtig für das Schwingverhalten sind die Belastungsgeschwindigkeit (Frequenz) und die Temperatur (Eigenerwärmung wegen hoher Dämpfung und geringer Wärmeleitfähigkeit (Bild 45)). Kerbempfindliche Kunststoffe haben eine geringe Dauerschwingfestigkeit.

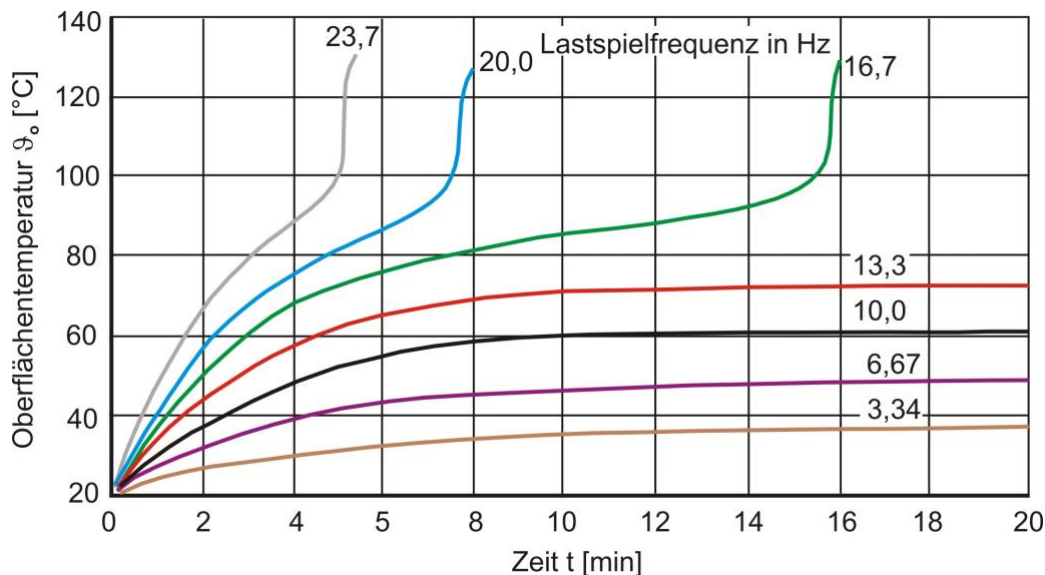


Bild 45: Dauerschwingversuch im Wechselbiegebereich an PMMA.
Anfangsamplitude $\sigma_a = 55 \text{ N/mm}^2$, Dehnungsamplitude ϵ konstant

6.3 Wasseraufnahme/Chemikalienbeständigkeit

Der Einfluss von Feuchte auf einen Kunststoff kann ggf. bereits allein durch die Änderung seiner Masse oder Maße nach einer Wasserlagerung nachgewiesen werden. Von einem Kochen bei dieser Lagerung erwartet man eine Zeitrafferwirkung.

Allgemein haben Kunststoffe eine gute chemische Beständigkeit. Thermoplaste sind beständiger gegen Säuren und Laugen, Duroplaste beständiger gegen organische Lösungsmittel. Richtwerte sind Tabelle 4 zu entnehmen. Die Industrie liefert für jeden Kunststoff Beständigkeitstabellen, die anhand der Ergebnisse von Lagerungsversuchen (oft nur über Wochen oder Monate) in verschiedenen Medien aufgestellt wurden.

Tabelle 4: Chemische Beständigkeit von Baukunststoffen

Kunststoff		Angreifende Stoffe																	
		Säuren					Laugen		Lösemittel				Treibstoffe und Öle						
		schwach	stark	oxidierend	Flusssäure	Halogene (tr.)	schwach	stark	Alkohole	Ester	Ketone	Äther	CKW	Benzol	Benzin	Treibstoffgem.	Mineralöl	Fette, Öl	
PE	HD	+	+	-	+	-	+	+	+	+	+	○	⊕	○	⊕	⊕	⊕	⊕	
	LD	+	+	-	+	-	+	+	○	○	○	-	-	-	⊖	-	○	⊖	
PP		+	+	-	○	⊖	+	+	+	⊕	⊕	○	⊖	⊖	⊕	○	+	+	
PIB		+	+	○	+	○	+	+	+	-	○	-	-	-	-	-	-	-	
PVC	U	+	+	⊕	⊕	○	+	+	+	-	-	-	⊖	-	+	⊖	+	+	
	P	+	⊕	○		-	+	○	○	-	-	-	-	-	⊖	-	○	○	
PMMA		+	+	○	○	○	+	+	○	-	-	○	-	-	+	-	+	+	
PVAC									-	-	-		-	-	⊕		⊕		
PS	hart	+	⊕	○	⊕	-	+	+	+	-	-	-	-	-	○	-	○	+	
	Schaum									-	-	-							
PTFE		+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	
PA		-	-	-	-	-	+	○	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	
UP		-	○	⊖	⊖	⊖	○	⊖	⊕	⊖	-	-	-	⊖	+	+	+	+	
EP		+	+	-	⊕	+	⊕	⊕	+	○	⊕	+	○	+	+	+	+	+	
PUR	hart	○	-	○	⊖		+	-	⊕	○	⊖	+	○	+	+	○	+	○	
	Schaum	+	○	-	-	-	○	○	⊕	-	-	⊕	-	⊖	+	○	+	+	
SI		+	-	-	-		+	⊕	⊖	⊖	+	-	-		○	○	○	⊕	
MF		○	-				+	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	
PF, Pressmasse		+	-				+	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	

(+) : beständig (⊕) : bedingt beständig bis beständig (○) : bedingt beständig
 (⊖) : bedingt unbeständig bis unbeständig (-) : unbeständig

6.4 Alterungsverhalten

Zeitraffende Alterungsuntersuchungen werden im Labor mit zyklischer, künstlicher Bewitterung (Temperatur, Luftfeuchte, Beregnung und Bestrahlung mit UV- oder Xenon-

Lampen, die einen dem Tageslicht ähnlichen UV-Anteil aufweisen) durchgeführt. Auslagerungsversuche im Freien sind sehr zeitaufwendig, lassen aber die Beständigkeit besser beurteilen. Auslagerungsart und Expositionsrichtung sind zu berücksichtigen.

Verschlechterungen: Versprödung, Verfärbung, Abnahme von Transparenz und Oberflächenglanz, Nachlassen der Klebewirkung, Rissbildung und Längenänderung durch Auflösen von Haupt- und Nebervalenzbindungen, durch Änderung des Kristallinitätsgrades oder durch Nachvernetzen

Verbesserungen: Zunahme an Festigkeit und Steifigkeit durch Nachvernetzen bei harten Kunststoffen sind im Allgemeinen unbedeutend.

Die Ungewissheit über die Quantifizierung der Alterung stellt trotz vielfältiger Untersuchungen noch immer ein großes Hindernis für eine zielsichere Verwendung neuer Kunststoffe in tragenden Bauteilen dar.

6.5 Brandverhalten

Fast alle Kunststoffe sind brennbar, einige sind leicht (Klasse B 3), andere normal (B 2) oder schwer entflammbar (B 1). Das muss besonders beim Einsatz im Hochbau berücksichtigt werden. Auch wenn im Brandfall offene Flammen nicht direkt auf den Kunststoff einwirken, können dennoch Schäden entstehen, wenn der Kunststoff wegen seiner niedrigen Wärmestandfestigkeit (50 °C bis 150 °C, PTFE 250 °C) seine Gebrauchsfähigkeit verliert. Gegenüber Stahl wirkt sich bei Kunststoffen allerdings wie bei Holz die geringe Wärmeleitung günstig aus. In bestimmten Fällen sind Kunststoffe ungünstig, die brennend abtropfen können.

6.6 Prüfung von Reaktionsharzen

Bei Kunststoffen, die auf der Baustelle aushärten, müssen die Verarbeitbarkeit und die Verarbeitungszeit bekannt sein. Die Verarbeitbarkeit wird durch die Zähigkeit (Viskosität) bestimmt. Die Dauer der Verarbeitbarkeit lässt sich aus der **Topfzeit** abschätzen. Das Ende der Topfzeit wird durch einen Temperaturanstieg auf 40 °C definiert.

Dauer der Verarbeitbarkeit (Topfzeit): Ein 100-ml-Harzansatz wird in einem wärmeisolierten Behälter quasi adiabatisch gelagert. Durch die Polymerisation wird Wärme frei. Der Temperaturverlauf gibt Auskunft über den Verlauf der Reaktion (Bild 46). Der Versuch dient zum Vergleich verschiedener Produkte unter Laborbedingungen.

Die Viskosität wird mit dem Rotationsviskosimeter ermittelt. Sie wird indirekt mit dem Absinken einer Kugel durch eine Harzsäule oder dem Auslaufen einer Harzmenge durch eine Düse gemessen. Bild 47 zeigt den Viskositätsverlauf von EP-Harzen bei isothermen Versuchsbedingungen.

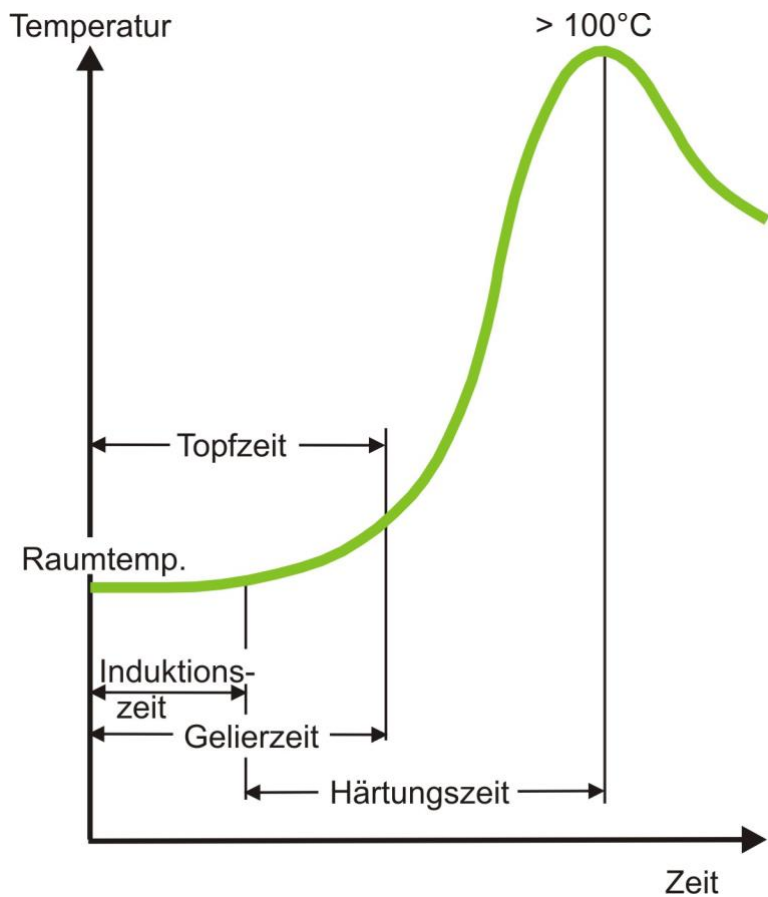


Bild 46: Härungsverlauf bei Polyesterharz (schematisch)

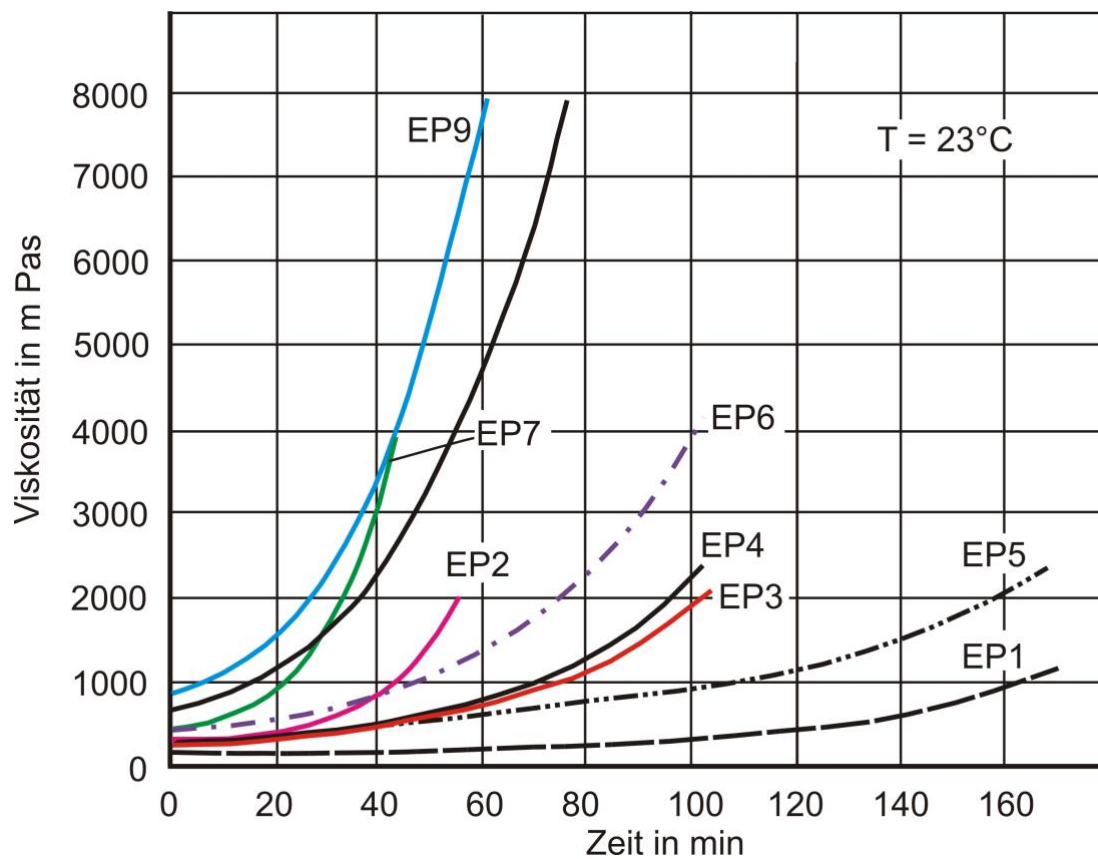


Bild 47: Viskositätsverlauf von EP (Koppelfugenharz) unter isothermen Bedingungen

6.7 Identitätsprüfung von Kunststoffen mittels FTIR-Spektroskopie

Die IR-Spektroskopie stellt eine einfache, schnelle und etablierte Methode zur Strukturaufklärung von organischen Verbindungen wie z.B. Kunststoffe dar. Als physikalisches Analyseverfahren gehört es zu den Methoden der Molekülspektroskopie.

Durch Absorption von Strahlung im infraroten Bereich des elektromagnetischen Spektrums werden Molekülschwingungen und -rotationen angeregt, welche direkt als Absorption im IR-Spektrum gemessen werden. Absorptionsbanden in definierten Bereichen des IR-Spektrums stehen für charakteristische Schwingungen von funktionellen Gruppen organischer Moleküle. Dadurch ist es möglich, funktionelle Gruppen durch die Lage ihrer Absorptionsbanden zu identifizieren und eine Substanz ihrer Verbindungsgruppe (Alkohol, Amin, Keton, ...) zuzuordnen (Bild 48).

Durch den Vergleich molekülspezifischer Fingerprint-Banden können mittels Vergleichsspektren aus Bibliotheken unbekannte Substanzen allein durch das IR-Spektrum identifiziert werden.

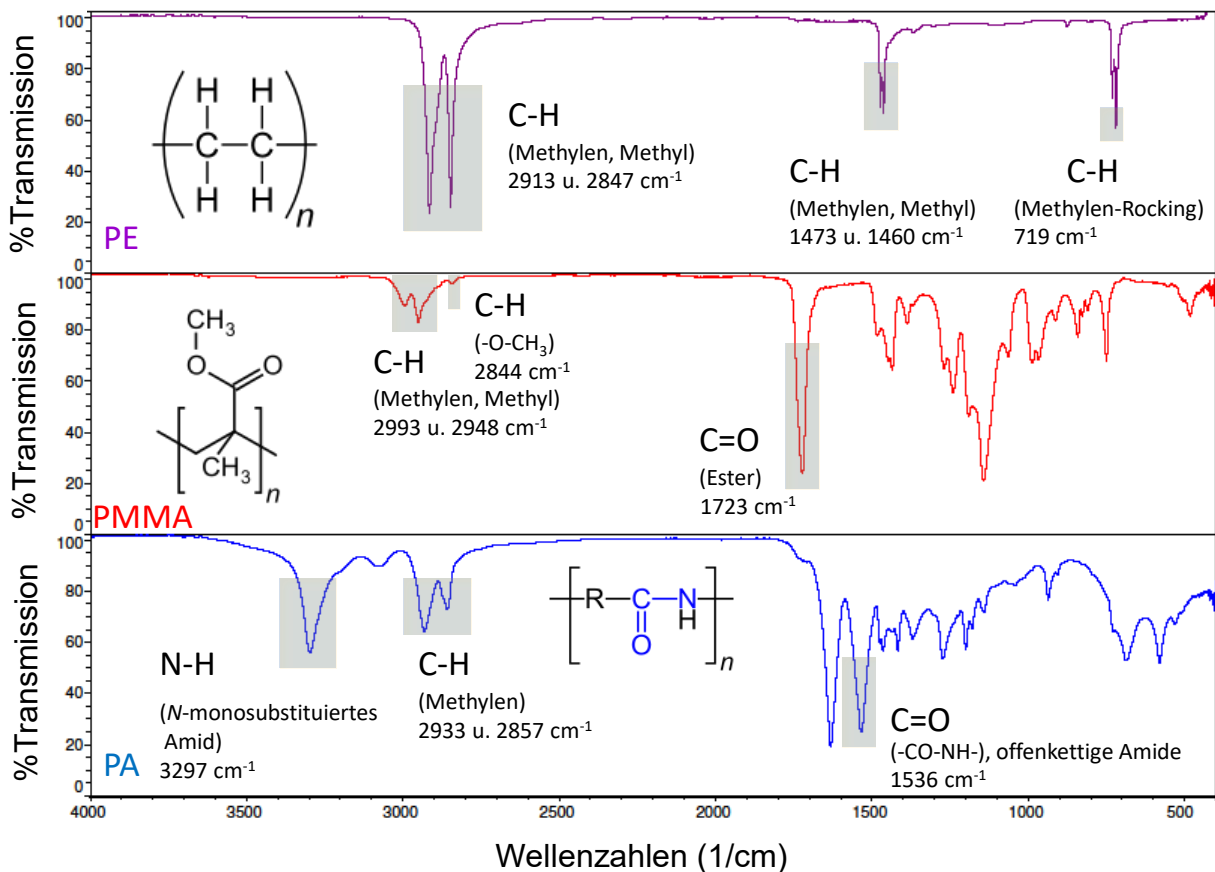


Bild 48: Identifikation von Kunststoffen (PE, PMMA und PA) mittels Infrarotspektroskopie.

7 Bemessung von Bauteilen

7.1 Bemessung mit abgeminderten Festigkeitswerten

Für den Einsatz von Kunststoffen in Tragwerken und selbsttragenden Elementen müssen sie einer gesicherten rechnerischen Bemessung zugänglich sein. Ein möglicher Ansatz wird in folgender Form angegeben.

$$\text{zul } \sigma = \frac{R}{A_1 \cdot A_2 \cdot A_3 \cdot A_4} \cdot \frac{1}{\nu}$$

Darin bedeuten

zul σ	zulässige Spannung
R	Kurzzeitfestigkeit
A _i	Abminderungsbeiwerte für Festigkeitsverluste infolge Kriechen, Alterung, erhöhter Temperatur, Produktionsschwankung
ν	Sicherheitsbeiwert

Eine entsprechende Gleichung kann für den Verformungsmodul aufgestellt werden.

Aus Laborergebnissen wurden z. B. für GF-UP (glasfaserverstärkte Polyester) folgende Abminderungsbeiwerte hergeleitet:

A ₁ (Kriechen)	1,4 3,4
A ₂ (Alterung)	1,1 1,6
A ₃ (Temperatur)	1,1 1,8
A ₄ (Produktionsschwankung)	1,1 1,5
<hr/>	
A ₁ · A ₂ · A ₃ · A ₄	1,9...14,7

Der Sicherheitsbeiwert ν wird gewöhnlich zwischen 1,75 und 2,10 angesetzt.

7.2 Bemessung anhand maximaler Verformungen

Eine bestimmte Grenzdehnung ϵ_n darf nicht überschritten werden. Man nimmt an, dass bei reinen Kunststoffen ϵ_n ein von der Temperatur, der Zeit und der Alterung nahezu unabhängiger Kennwert ist (z.B. amorphe Kunststoffe $\epsilon_n = 0,7\%$ bis $0,9\%$).

Um den Einfluss des Kriechens zu erfassen, wird ein so genannter Kriechmodul E_c benutzt (Bild 49). Bei seiner Ermittlung wird die Kurzzeitdehnung um die Kriechdehnung erhöht. Aus einem Kriechversuch (Bild 40 und Bild 41) lassen sich so die Kriechmodullinien (Bild 50) errechnen.

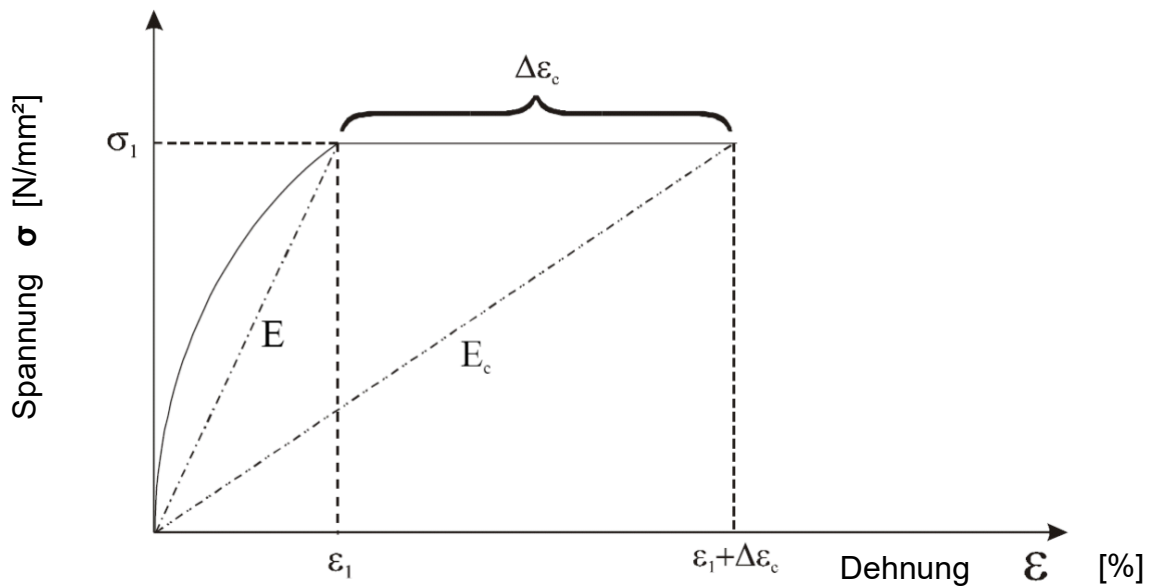


Bild 49: Definition des Kriechmoduls

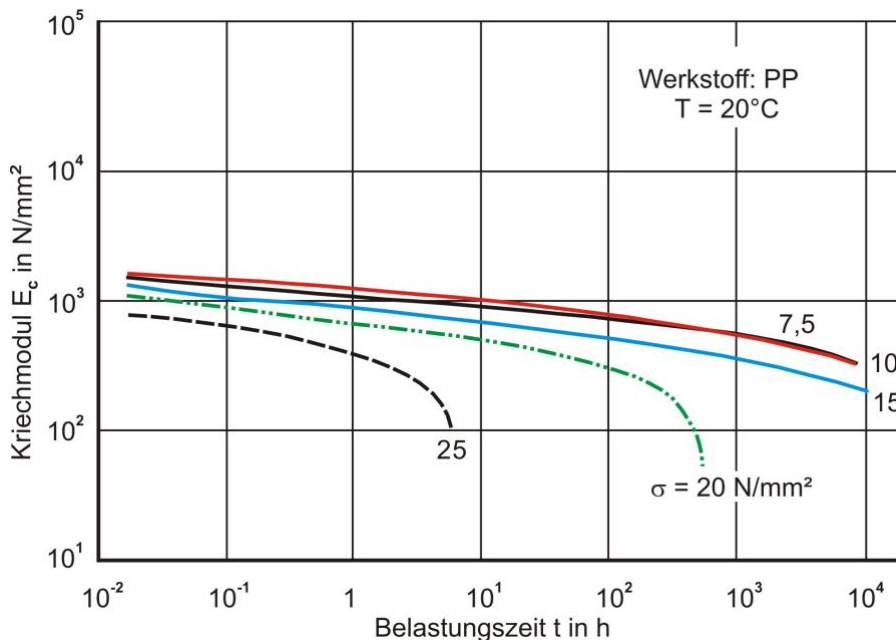


Bild 50: Kriechmodullinien eines Thermoplasten bei 20 °C und unterschiedlichen Spannungen

7.3 Elastomere Baulager

Verglichen mit Ungewissheiten, die eine Bemessung für Bauteile aus Thermoplasten und Duroplasten im Glaszustand mit sich bringt, ist der zielsichere Einsatz von Elastomeren fast ohne Probleme. Elastomere werden in tragender Funktion als Baulager in Brücken und Hochbauten bzw. in Feder/Dämpfer-Elementen im Maschinenbau, bei Hochbauten in Erdbebengebieten oder im schotterlosen Oberbau eingesetzt. Elastomere Baulager altern nur wenig.

Ihre Verformbarkeit im gummielastischen Zustand ist selbst nach Versprödung noch erheblich größer als in den angrenzenden Bauteilen. Die Druckfestigkeit eines Lagers ist so groß, dass die angrenzenden Bauteile zerstört werden, bevor der Gummi aufreißt. Die

Temperaturabhängigkeit der Elastomere in handelsüblicher Qualität ist zudem im Bereich von ca. -30 °C bis $+70\text{ °C}$ technisch gesehen vernachlässigbar.

8 Halbzeuge und Fertigprodukte für das Bauwesen

8.1 Fertigteile aus Thermoplasten

Hochbau, Ausbau des Rohbaues

- Außenwandbekleidungen aus PVC-U,
- Dacheindeckungen aus schwer entflammbar eingestellten Kunststoffen (z.B. PVC-P) oder aus mit nicht brennbaren Stoffen verstärkten Kunststoffen (z.B.: GFK).
- Fensterrahmen, Rollläden, Balkonbekleidungen aus PVC-U, Fensterscheiben, Oberlichter, Lichtkuppeln, Lichtwände, Gewächshäuser aus PMMA (gereckt und ungereckt) oder PC, Dichtungsprofile (vgl.Kapitel 8.6).

Rohre (Hoch- und Tiefbau)

- Trinkwasserrohre aus PVC-U, PE
- Abwasserrohre aus PP, PE-HD oder PVC-U

Innenausbau

- Dübel aus PA,
- Sanitärartikel aus PVC-U, PP, PS, PMMA,
- Fußbodenbeläge aus PVC-P, PVC-U, PA, Polyester und PUR.

8.2 Fertigteile aus Duroplasten

Aus Polyesterbeton werden unter anderem hergestellt: Rohre, Waschbecken, Sanitärzellen.

8.3 Faserverstärkte Kunststoffe

Fasern haben einen im Vergleich zur Länge sehr kleinen Durchmesser. Einige mechanische Eigenschaften häufig genutzter Fasertypen sind in Bild 51 zusammengestellt. Die Zugfestigkeiten der Fasern sind gegenüber den kompakten Ausgangsmaterialien viel größer.

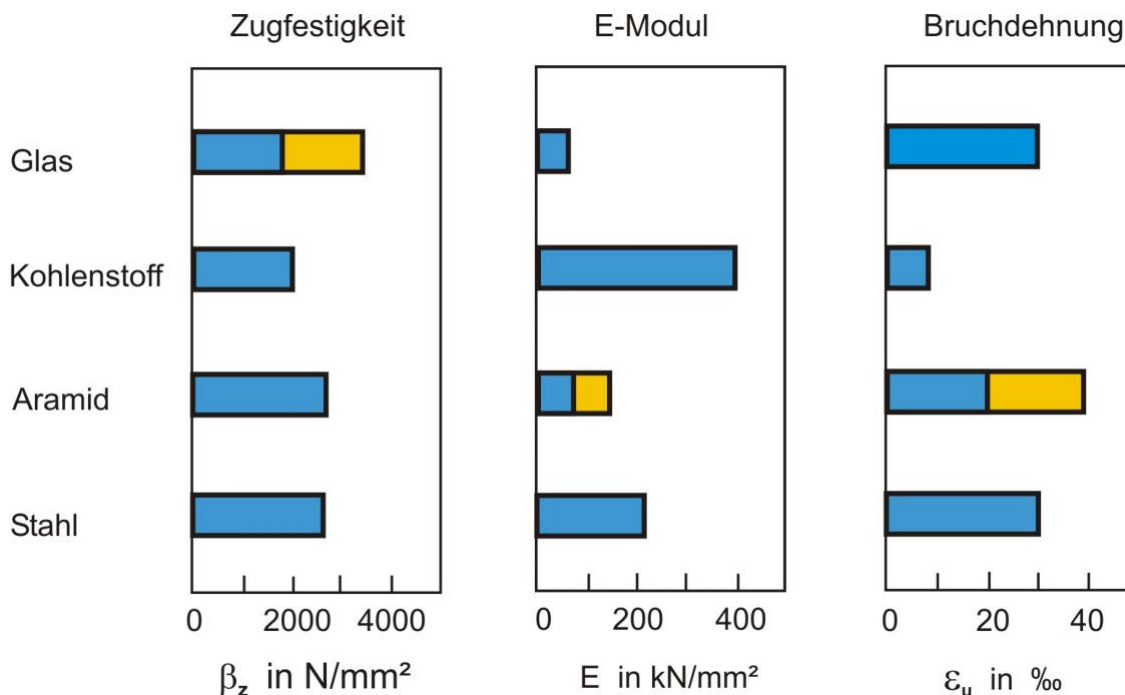


Bild 51: Mechanische Eigenschaften einiger Faserarten

Der Begriff Glasfaserverstärker Kunststoff (GFK) wird nur für harte Kunststoffe, im Wesentlichen für Duroplaste angewendet. Für die mechanischen Eigenschaften von GFK sind bestimmend:

- Festigkeit, E-Modul und die Länge der Faser,
- Festigkeit, E-Modul und Bruchdehnung des Kunststoffes,
- Anordnung und Volumenanteil der Fasern (max. ca. 80 Vol.-%),
- Verbundverhalten zwischen Faser und Kunststoff.

Ein optimales Tragverhalten des Verbundwerkstoffes wird erreicht, wenn der E-Modul der Faser um ein Vielfaches größer als der des Kunststoffes und die Bruchdehnung des Kunststoffes größer als die der Faser ist (Bild 52). Die Verbundpartner müssen untereinander chemisch und thermisch verträglich sein.

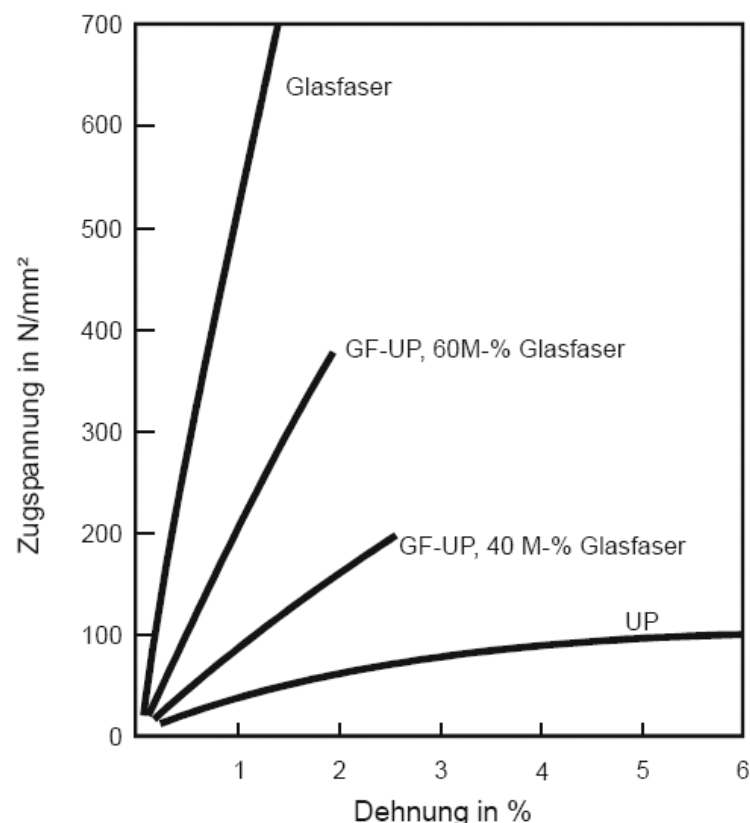


Bild 52: Spannungs-Dehnungs-Linien für Glas und UP-Harz

Glasfasern sind seidenartige, elastische Fäden mit Durchmessern von ca. 10 μm . Ihre Oberfläche wird mit einer Schlichte versehen, durch die die Fasern geschmeidiger und ihre Haftung zum Harz verbessert wird (Haftbrücke).

Die Fasern werden in Strängen meist zu 3000 bis 20000 Stück gebündelt. Solche Stränge (Rovings) können direkt in die Harzmatrix eingebettet werden. Liegen alle Fasern in einem Bauteil in einer Richtung, spricht man von unidirektionaler Rovingverstärkung. Werden Stränge miteinander zu einem Gewebe verwebt oder werden die Stränge zu kurzen Stückchen zerschnitten und zu einem regellosen Filz gepresst, spricht man von Gewebe- bzw. Mattenverstärkung.

Als Bindemittel wird hauptsächlich Polyesterharz (GF-UP) verwendet. Nicht eingefärbt ist GFK transparent und deshalb für raumabschließende, lichtdurchlässige Elemente geeignet.

Die Bauteile können folgendermaßen hergestellt werden:

- Verstärkung durch Matten oder Gewebe, im Handauflegeverfahren bzw. maschinelles Pressen bei relativ einfachen Formen,
- Wickeln von Rotationskörpern, Verstärkung - im Umfang durch Rovings, in Achsrichtung durch Gewebe - ermöglicht hohen Glasgehalt bis zu 80 %,
- Kontinuierliches Pressen für Platten und Stäbe,
- Faserspritzen auch für relativ kompliziert geformte Bauteile - Harz, Härter und kurz geschnittene Fasern treffen erst an der Spritzpistole zusammen - ermöglicht nur geringen Glasgehalt.

Die Eigenschaften der Bauteile hängen - wie bei Holz - vom Last-Faserwinkel ab: Matten haben keine bevorzugte Tragrichtung, Gewebe tragen in zwei Richtungen, Rovings in eine.

Im Bereich des Massivbaus wurden kleinere vorgespannte Bauwerke ausgeführt, die mit GFK-Stäben bewehrt sind. In Bild 53 sind die Spannungs-Dehnungs-Linien eines Spannstahls der Güte St 1470/1670 und eines Hochleistungs-Verbundwerkstoffes (HLV) dargestellt.

Beide Werkstoffe weisen eine vergleichbare Zugfestigkeit auf. Völlig unterschiedlich ist dagegen ihr Spannungs-Dehnungs-Verhalten: Während der Stahl ein elastisch-plastisches Verhalten zeigt, bleibt der HLV-Werkstoff bis zum Bruch elastisch. Durch die sehr unterschiedlichen E-Moduln weichen die Dehnungen bereits im Bereich der Gebrauchsspannungen deutlich voneinander ab. Die positive Konsequenz einer größeren Dehnung ist, dass Betonverkürzungen aus Kriechen und Schwinden für die HLV-Spannbewehrung von untergeordneter Bedeutung sind.

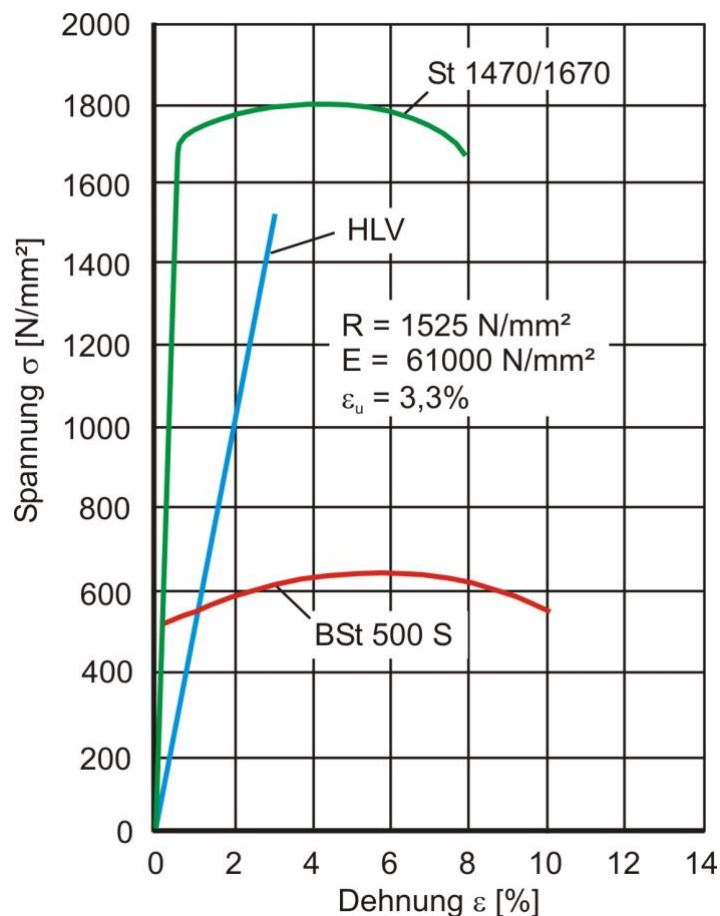


Bild 53: Spannungs-Dehnungs-Linien von Spannstahl und HLV

Zur Beurteilung der Bauwerksicherheit ist aber auch darauf zu achten, dass Spannstahl noch ein ausgeprägtes Fließvermögen hat, das dem HLV-Werkstoff völlig fehlt. Da die hochbelasteten Stäbe empfindlich sind gegen punktartige hohe Belastung im Bereich der Verankerung, und da die Übertragung der Kräfte von den Randfasern auf die inneren Fasern problematisch ist, hängt die weitere Verbreitung dieser Bewehrungsweise stark von der befriedigenden Konstruktion der Endverankerung ab.

Lokale Verstärkungen von Massivbauten wurden auch schon in GFK ausgeführt. Anstelle des nicht unbedingt alkaliresistenten GF-UP benutzt man hierzu GF-EP.

8.4 Schaumkunststoffe

Im Prinzip lassen sich alle Kunststoffe aufschäumen. Es gibt harte und weichelastische Schaumstoffe. **Ortschäume** sind zäh bis spröde hart vernetzte Einkomponentenschäume aus den Rohstoffen PUR und UF, die erst am Bauwerk aufgeschäumt werden. Als **Hartschäume** sind gebräuchlich:

Polystyrol

Polystyrol (PS-Hartschaum ist ein geschlossenzelliger, zäh harter Schaumstoff) Dämmplatten aus Polystyrol-Hartschaum sind alterungsbeständig, verrottungsfest und nehmen nur wenig Wasser auf. Durch Lösungsmittel (vgl. Tabelle 4) und Temperaturen über 110 °C kann er zerstört werden. Nach dem Herstellungsverfahren werden unterschieden:

- Dämmplatten aus Partikelschaum, die aus Blöcken geschnitten bzw. im Brandverfahren kontinuierlich gefertigt werden. In elastischer Einstellung sind diese Platten für den Trittschallschutz geeignet.
- Automatenplatten aus Partikelschaum, die bereits bei der Fertigung ihre endgültige Form erhalten.
- Extrudierte Polystyrol-Hartschaumplatten, die im Strangpressverfahren hergestellt werden und an ihrer dichten, glatten Oberfläche erkenntlich sind.

Hartschaumdämmplatte gibt es in Form von expandiertem Polystyrol (EPS) und als extrudierte Polystyrolplatten (XPS). PS-Schaum wird auch als aufgeblähtes Granulat z. B. als leichte organische Körnung im Beton verwendet.

Polyurethan

Polyurethan (PUR)-Hartschaum ist ein überwiegend geschlossenzelliger, zäh harter Schaumstoff. Polyurethan-Ortschaum wird an der Baustelle hergestellt, vernetzt mit Wasser als Reaktionspartner (Verwendbarkeit wird durch die Baufeuchte nicht gestört) und wird z. B. für die Dämmung von Flachdächern sowie für die Montage von Türzargen und Fensterrahmen verwendet.

Durch die Zellstruktur haben Schäume eine äußerst geringe Rohdichte (10 bis 100 kg/m³), ein hohes Dämmvermögen (0,015 bis 0,05 W/(m·K)) (Bild 54) und eine hohe Luftschallabsorption. Wasseraufnahme (0 % bis 15 %) und Dampfdiffusion ($\mu = 5$ bis 900) hängen vorwiegend von der Zellstruktur (offen oder geschlossen) ab.

Festigkeiten und Verformungsmodul sind generell niedrig und u. a. proportional zur Rohdichte. Die Druckspannungen bei 10 % Stauchung liegen bei den harten Schaumstoffen je nach Kunststoff und Dichte zwischen 0,01 N/mm² (UF) und 1,0 N/mm² (PUR), die Zugfestigkeiten zwischen 0,1 N/mm² und 3,0 N/mm² und die Elastizitätsmoduln (Biegeversuch) zwischen 5 N/mm² und 50 N/mm².

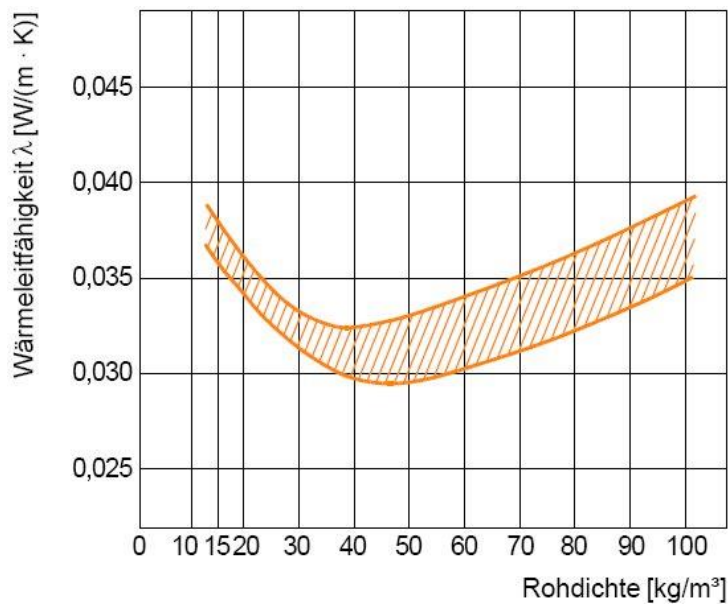


Bild 54: Wärmeleitfähigkeit von EPS-Hartschaum in Abhängigkeit von der Rohdichte

Frische Schäume brechen an ihren Grenzflächen. Sie erhalten dadurch eine dichte Außenhaut, eine gute Verklebung zu angrenzenden Festkörpern und eine feinere Zellstruktur im Außenbereich (Integralschaum).

Als **Weichschäume** werden Erzeugnisse auf der Basis von PUR, PVC, PE z.B. für das Hinterfüllen von Fugenmassen verwendet.

8.5 Sandwichelemente

Für flächige biegebeanspruchte Bauteile (Fassadenelemente, Trennwände, Dachplatten, Industrietore) bietet es sich an, harte Schaumstoffe als Stützkern zwischen die Deckschichten in der Druck- und Zugzone einzusetzen. Mit geringer Eigenlast können so große Biegemomente aufgenommen werden. Als Deckschichten werden Bleche, Faserlaminare oder Holzwerkstoffe benutzt. Die Deckschichten werden entweder auf den Kern geklebt oder der selbsthaftende Schaum wird zwischen den Deckschichten aufgeschäumt.

Bei Raum abschließenden Sandwichelementen können bauphysikalische Probleme auftreten.

8.6 Folien, Dichtungsbahnen, Geotextilien

Folien werden meist aus weichen Thermoplasten im Kalandrier (Walzen) oder Extruder (Auspressen aus Ringschlitzdüse und anschließendes Aufblasen im plastischen Zustand) hergestellt. Folien werden in Dicken ab 0,01 mm Bahnen bis 4 mm Dicke geliefert und können mit Fasern aus höherfesten Kunststoffen in Gewebeform oder Vlies verstärkt werden. Die verwendeten Kunststoffe sind hauptsächlich PVC-P, PEC (C = chloriert), PIB, EPDM.

Die einzelnen Bahnen (außer EPDM) können heiß oder z.T. auch kalt (durch Lösungsmittel) verschweißt werden. Verklebungen von verstärkten Folien sind empfindlich bei Zugbeanspruchung, da die Gewebeverstärkungen nicht verbunden werden.

Folien sollen bei Verwendung im Freien bei Temperaturen von -30 °C nicht versteifen und bei +80 °C nicht fließen.

Abdichtungen sind flächige, wasser- und dampfsperrende Dachabdichtungen, Grundwasserabdichtungen, Abdichtungen von Deponien, Dämmen, Tunneln und Baugruben.

Bitumenbeständige Bahnen (stets schwarz eingefärbt) können mit Bitumen geklebt werden. Zur Vermeidung von extremer UV- und IR-Einwirkungen können Abdichtungen von Flachdächern mit Kies abgedeckt werden.

Selbsttragende Konstruktionen sind z. B. Luftkissendächer, Traglufthallen, Zeltkonstruktionen, bewegliche Wehre. Sie werden stets aus faserverstärkten Bahnen hergestellt.

Geotextilien werden im Erd- und Wasserbau verlegt. Das sind meist wasserdurchlässige Vliese oder Gewebe, z.B. unter den Schotterlagen beim Eisenbahnbau, unter Tragschichten von Straßen oder zur Befestigung von Böschungen, Dämmen und Ufern. Das Vlies oder Gewebe wirkt als Filter bzw. als Bewehrung. Wasser wird gefiltert und abgeleitet, das Aufsteigen oder Ausspülen von Feinstteilen des Bodens verhindert. Bei Dämmen aus schlechtem Schuttmaterial oder bei weichem Untergrund werden erhebliche Zugspannungen aufgenommen und über Reibung in die Schüttungen abgetragen. Die Fasern der Geotextilien bestehen z.B. aus linearen Polyestern, PE oder PP.

8.7 Fugenbänder

Bei jedem größeren Bauwerk sind Dehnungs- und Arbeitsfugen unvermeidlich. Zur Abdichtung der Fugen in Massivbau gegen Grund- und Oberflächenwasser kann der Einbau von Fugenbändern erforderlich sein. Sie müssen der Fugenbewegung ohne Beeinträchtigung der Dichtung und ohne Überbeanspruchung des Betons elastisch folgen können. Werkstoffe PVC-P (schweißbar), Elastomer (Verbindungen durch Vulkanisieren).

Fugenbänder sind genormt. Sie werden bereits beim Betonieren im Bereich der Arbeits- und Bewegungsfugen eingesetzt. Je nach Lage im Bauteil und der zu erwartenden Bewegungsgröße sind sie unterschiedlich geformt (Bild 55).

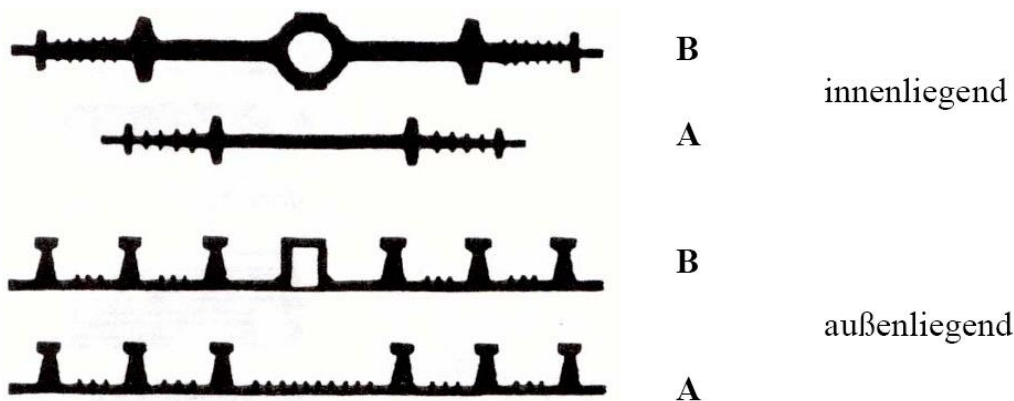


Bild 55: Fugenbänder für Arbeits- (A) und Bewegungsfugen (B)

Die Profilierung der Bänder erhöht die Haftung im Beton und vergrößert den Weg, den das Wasser beim Durchtreten zurücklegen müsste. Zum Abdecken, zum wind- und staubdichten Abschluss von Fugen dienen Profile, die nachträglich eingeklemmt, selten eingeklebt werden. Vakuumschläuche können auch tiefer in eine Fuge eingebracht werden, sie werden nach dem Einbau belüftet. Ihre Dichtwirkung gegen Wasser ist relativ mäßig. Bei drückendem Wasser finden sie keine Anwendung.

8.8 Lager

Lager werden aus Elastomeren hergestellt, die hauptsächlich aus drei Arten von Kautschuk vulkanisiert werden.

Elastomer aus:

- **Naturkautschuk (NR)** (R=Rubber): Nicht sehr alterungsbeständig (Ozon- und UV-Angriff) gut brennbar und in der Flamme schmelzend.
- **Chloroprenkautschuk (CR)**: Seit 60 Jahren bekannt, sehr alterungsbeständig, schwer entflammbar. In der Kälte früher versteifend als Naturkautschuk.
- **Ethylen-Propylen-Terpolymer-Kautschuk (EPDM)**: Verhalten ähnlich wie CR, in den Festigkeiten etwas schlechter, in der Kälte etwas besser, billig, schlechte Vulkanisationshaftung auf Stahl, Verwendung in Baulagern nur unbewehrt.

Elastomerlager können Horizontalverschiebungen und Verdrehungen aufnehmen (Bild 56)

Das seitliche Ausweichen von Elastomer bei Druckbeanspruchung kann außer durch Bewehrung (Bild 57) auch dadurch verhindert werden, dass man das Material in einem stählernen "Topf" mit beweglichem, abgedichtetem "Deckel" einschließt (Bild 58). Die Elastomerplatte verhält sich bei hohen Drücken wie eine inkompressible Flüssigkeit. Bei Drehung des Deckels um die Kippachse des Lagers bewegt sich das Elastomer von den höher belasteten zu den niedriger belasteten Bereichen.

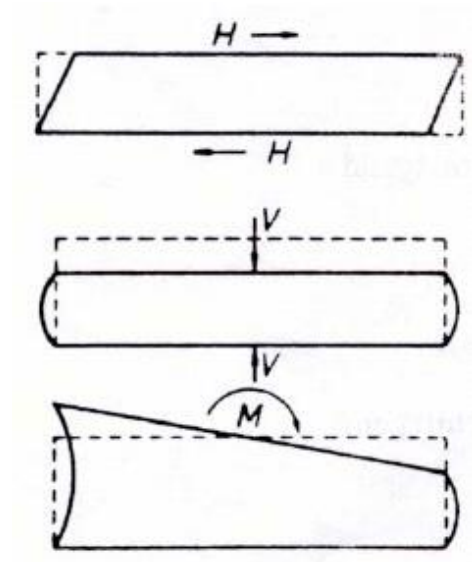


Bild 56: Verformungen von Elastomerlagern

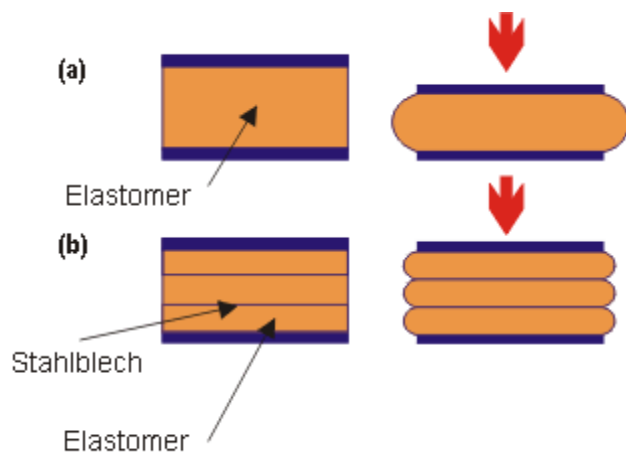


Bild 57: Stauchung von Elastomerlagern bei gleicher Vertikalkraft

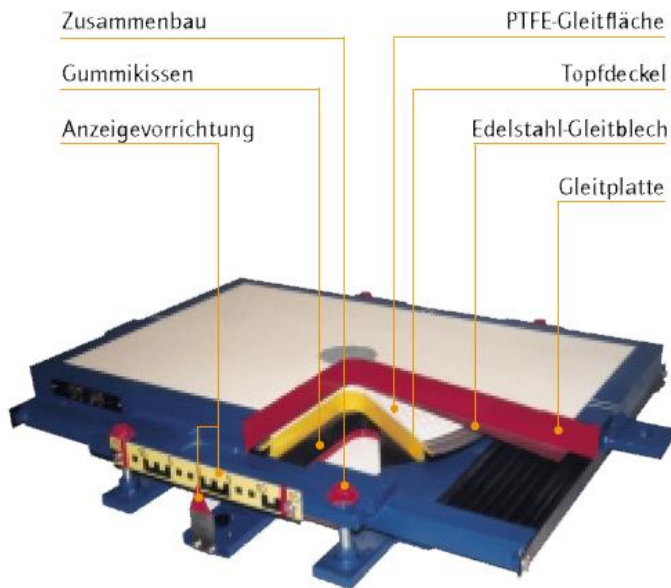


Bild 58: Topflager (Prinzip) [Lit 6]

Elastomere werden im Temperaturbereich von -30 bis +70 °C als Baulager eingesetzt (Bild 59). Die Temperaturabhängigkeit ist technisch gesehen in diesem Bereich vernachlässigbar.

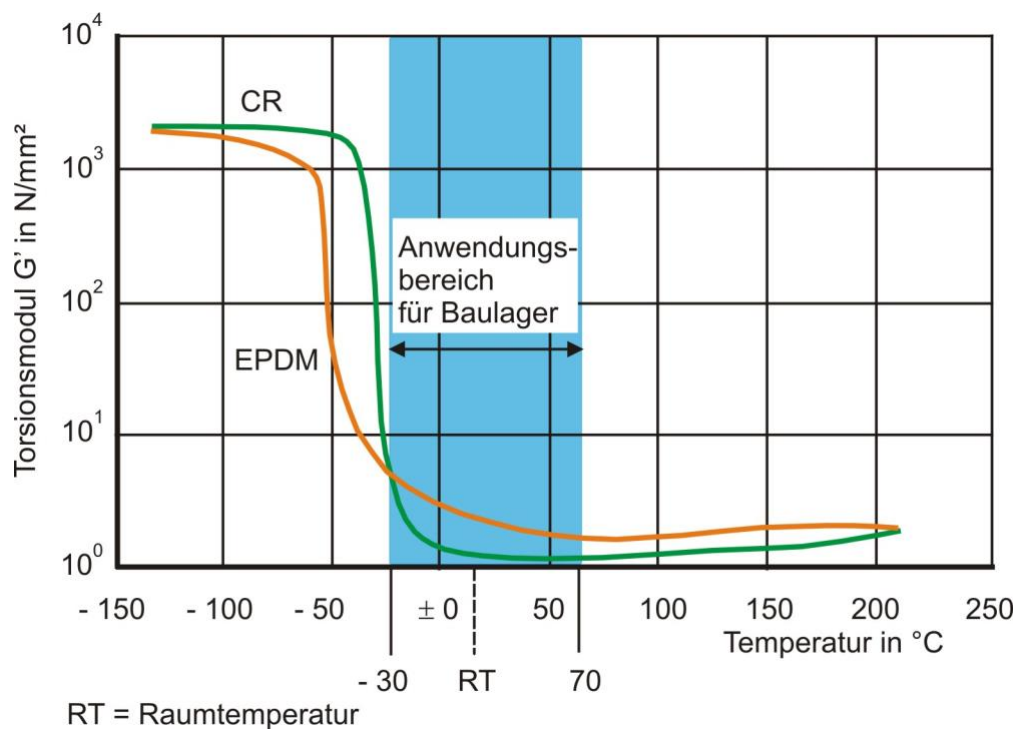


Bild 59: Kälteverhalten von Elastomeren

Die nachfolgende Aufstellung gibt Anhaltswerte für die Pressung [N/mm^2] verschiedener Lager:

Unbewehrte Lager	5 ... 10
Bewehrte Lager	15
Topflager	25

Für Lager, die größere Bewegungen aufnehmen müssen, nutzt man die hervorragenden Gleiteigenschaften von PTFE auf Stahl (siehe Bild 58). Die Reibungszahlen betragen nur 0,01

bis 0,05. Als zusätzliches Gleitmittel wird Siliconfett verwendet. Wichtig ist für die Zuverlässigkeit der Gleitlager, dass die Gleitflächen sauber sind und eben aufeinander liegen.

Gleitlager im Hochbau und Gleitfolien z.B. unter Behältern und Eisstadien nutzen in einfacher bis einfachster Ausführung die geringe Reibung zwischen verschiedenen Thermoplasten bzw. Duroplasten. Gebräuchlich sind die Gleitpaarungen PVC/PVC, PE/PE, PTFE/UP. Voraussetzung ist eine völlig ebene Gleitfläche.

9 Am Bauwerk erhärtende Kunststoffe

9.1 Oberflächenschutz von porösen Baustoffen

Die Schutzmaßnahmen sollen die Aufnahme von flüssigem Wasser und von Schadstoffen, z.B. Chlorid, die im Wasser transportiert werden, behindern. Bei Stahlbetonbauten sollen sie den CO₂-Zutritt bremsen, da die trocken liegenden Bauteile sonst rascher carbonatisieren würden. Sie sollen aber andererseits, besonders bei Hochbauten, den Transport von Wasserdampf möglichst wenig beeinträchtigen. Wasseranreicherungen hinter der Beschichtung können zu Frostschäden führen.

Die Maßnahmen reichen von Hydrophobierung über Imprägnierungen bis zu Reprofilierungen von tiefen Ausbrüchen (Bild 60).

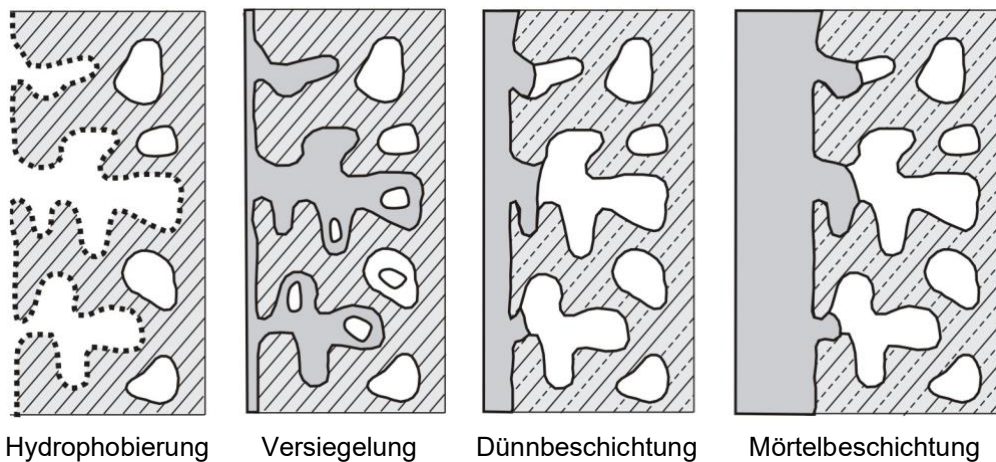


Bild 60: Definition der Beschichtungsarten

Die Schutzschichten müssen fest auf dem Untergrund haften, ihre Verformungen müssen mit dem Untergrund verträglich sein ($\Delta\alpha_t \cdot \Delta T$).

9.1.1 Imprägnierungen

Imprägnierungen bilden keinen geschlossenen Film, die Poren sind nicht gefüllt, die Kornspitzen nicht überdeckt. Imprägnierungen werden in Form von sehr niedrig viskosen, oft mit Lösungsmitteln versetzten Kunststoffen durch Spritzen oder Streichen aufgebracht. Das Imprägnierungsmittel dringt in festen Beton nur wenige Millimeter ein, überzieht die Innenwandungen der Poren mit einem dünnen Film, ohne an der Oberfläche eine Sperrschicht zu bilden. Der zu schützende Baustoff bleibt dabei dampfdurchlässig. Die meisten Mittel wirken Wasser abstoßend (hydrophob). Unter günstigsten Voraussetzungen kann eine Beständigkeit der Imprägnierung von mehr als 10 Jahren erwartet werden.

Siloxane (Siliconharze, Silicone) sind hoch polymere, hydrophobierende Stoffe mit einem SiO-Gerüst. Sie können in mehreren Arbeitsgängen aufgetragen werden, gelten nicht als gesundheitsschädlich und greifen andere Baustoffe nicht korrodierend an.

Silane sind chemisch gesehen die Monomere der polymeren Siloxane. Sie sind im Gegensatz zu diesen in Lösungsmitteln löslich. Eine gewisse Untergrundfeuchte und auch Alkalität sind für die chemischen Reaktionen von Vorteil. Die Silanmonomere vernetzen auf der Baustoffoberfläche und gehen gleichzeitig mit dem Baustoff echte chemische Bindungen ein.

Lösungsmittelhaltige Kunstharze vor allem auf der Basis von PMMA und EP haben keine hydrophoben Eigenschaften. Mischungen davon mit hydrophoben Stoffen können dagegen einen wenig widerstandsfähigen, grobporigen Untergrund gleichzeitig verfestigen und hydrophobieren.

9.1.2 Versiegelungen

Versiegelungen bilden einen geschlossenen Film (bis 0,3 mm Dicke). Sie dringen in die oberste Schicht des Baustoffes ein und bilden eine mehr oder weniger diffusionsdichte, abschließende Haut. Versiegelungsmittel müssen sehr niedrig viskos sein, Auftrag durch Spritzen oder Streichen. Zur Anwendung kommen Reaktionsharze, z.B. EP.

9.1.3 Beschichtungen

Beschichtungen sind an der Baustoffoberfläche haftende Überzüge, die in flüssiger Form, ein oder mehrschichtig aufgestrichen, aufgespritzt oder aufgespachtelt werden. Der Untergrund muss zunächst vorbereitet (gesäubert) werden (Richtlinie für Schutz und Instandsetzen von Betonbauteilen des DAfStb). Meistens ist zunächst eine Grundierung (Primer) erforderlich. Dickere Beschichtungen können mit Steinmehl oder Sand abgemagert werden (vgl. Kapitel 9.3). Die Kunststoffe können dabei in dispergierter, gelöster oder reiner Form aufgebracht verwendet werden:

- Lösungen von Thermoplasten (z.B. Acrylat, Chlorkautschuk, PVC) hohe Sperrwirkung gegen CO₂, bei Acrylat geringe Sperrwirkung gegen Wasserdampf,
- Dispersionen von Thermoplasten (z.B. Vinylacetat, Vinylpropionat): geringe Sperrwirkung gegen CO₂,
- Duroplaste (Reaktionsharze) mit/ohne Lösungsmittel.

Lösungsmittelfreie Systeme können im Vergleich zu denen mit Lösungsmittel folgende Eigenschaften aufweisen:

- Höher viskos,
- weniger lang verarbeitbar,
- dickschichtiger auftragbar,
- physiologisch unbedenklicher.

Oberflächenbehandlungen mit Reaktionsharzen sollen nur auf trockenen Untergründen ausgeführt werden. Auf feuchtem Untergrund haftet die Beschichtung weniger gut. Der Untergrund kann nicht mehr nach oben austrocknen. Es können Frostschäden auftreten. Bei Dispersionen kann eine gewisse Feuchte des Untergrunds toleriert werden.

9.2 *Verpressen von Rissen und Fehlstellen*

Als Verpressmaterial verwendet man:

- feste (harte), aber nicht unbedingt spröde Harze für die kraftschlüssige Wiederherstellung der ursprünglichen Belastbarkeit, allgemein lösungsmittelfreie Epoxidharze,
- weiche abdichtende Massen zum Verschluss der Risse gegen Feuchtigkeit und Gase, üblicherweise auf Polyurethanbasis. Sie können geschäumt ähnlich wie die Fugenmassen (vgl. Kapitel 9.4) gewissen Rissbewegungen folgen,
- mit Wasser schlagartig reagierende und damit absperrende, ggf. stark porige Materialien ebenfalls auf der Basis von Polyurethan,
- gelartige, durch Wasser reversibel quellende Stoffe auf der Grundlage von Acrylaten,
- harte Massen auf Zementbasis, oft kunststoffmodifiziert.

Es handelt sich also ausschließlich - bei Kunststoffen wie bei Zementleim bzw. -suspensionen um reaktive Zweikomponentensysteme.

Die EP-Harze für kraftschlüssige Verbindungen haben folgende Eigenschaften:

- geringerer linearer Schrumpfung als bei PU und Acrylaten,
- alkalibeständiger als UP,
- feuchtigkeitsunempfindlicher als PUR,
- gute chemische Beständigkeit.

Sie werden sehr niedrig viskos eingestellt und können bei genügend langer Topfzeit unter der Wirkung von Verpressdruck und Kapillarität Risse bis auf 50 µm Breite sicher ausfüllen. Für einen guten Verpresserfolg müssen die Risse trocken sein.

9.3 Bindemittel für Mörtel

Da die verwendeten Kunststoffe höhere Festigkeiten als Zementstein haben, sind die Festigkeiten der Mörtel und Betone entsprechend höher. Der E-Modul ist wegen des relativ kleinen E-Moduls der Kunststoffe deutlich niedriger als bei Zementbeton. Die Wärmedehnzahl ist größer. Als Bindemittel sind alle lösungsmittelfreien Reaktionsharze anwendbar, die verwendeten Gesteinskörnungen müssen trocken sein.

Ähnlich wie beim Zementbeton soll mit möglichst wenig Harz ein gut verdichtbarer Beton bzw. Mörtel erzeugt werden. Mischungen oberhalb ca. 1:10 sind nur mit schwerem Gerät zu verdichten. Bild 61 zeigt exemplarisch den Einfluss des Mischungsverhältnisses auf die erzielbaren Festigkeitswerte.

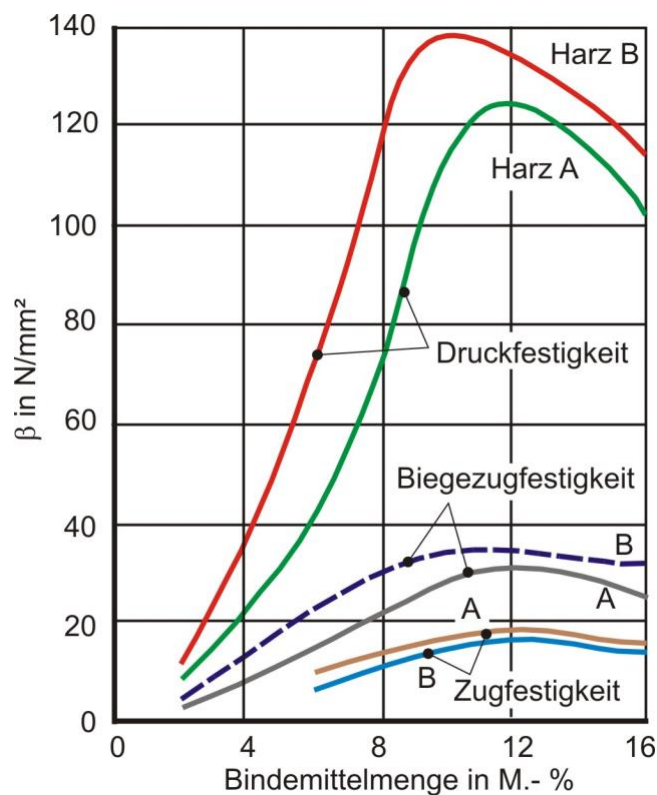


Bild 61: Festigkeiten von Epoxidharzmörtel in Abhängigkeit vom Mischungsverhältnis

Die Verarbeitungszeiten (Topfzeiten) hängen von Einstellung (Formulierung), Ansatzmenge und Temperatur ab. Die Topfzeiten können wenige Minuten bis mehrere Stunden betragen. Reaktionsmörtel mit dichtem Gefüge sind dampfdicht. Wenn sie als Beschichtungen

aufgetragen werden, kann die mechanisch-thermische Beanspruchung des Verbundsystems durch das Produkt $E \cdot \alpha_t \cdot \Delta T$ von Beschichtung und Beton abgeschätzt werden.

Eine größere Ähnlichkeit mit dem Zementbeton haben so genannte **Kunststoffmodifizierte Mörtel**, bei denen bis zu ca. 10 % des Zementleims durch Polymere in Form von Dispersionen ersetzt wird. Sie werden im internationalen Sprachgebrauch als **PCC** (polymer cement concrete) oder **ECC** (epoxy cement concrete) bezeichnet.

9.4 Fugenmassen

Die Massen haben plastische bis elastische Eigenschaften. Während bei rein plastischen Massen Spannungen schnell abgebaut werden und bei Verformungen der sog. Kaugummieffekt (Bild 62) eintritt, haben rein elastische Massen den Nachteil, dass bei ihnen Spannungen nicht abgebaut werden, wodurch die Bindeflächen zu den angrenzenden Bauteilen stark beansprucht werden.

Gebäuchlich sind elastoplastische Ein- oder Zweikomponenten-Massen auf der Basis von Polyurethan, Silicon und Polysulfid. Ihre Erhärtung erfolgt entweder durch physikalische Trocknung oder Vernetzung. Fugenmassen erreichen im Normversuch an kleinen Probekörpern Dehnungen bis zu 1000 %. In der Fuge am Bauwerk, bei der die Fugenmasse in Fugenlängsrichtung praktisch starr eingespannt ist und bei der Langzeiteffekte (vgl. Kapitel 6.2.2) und IR/UV-Einwirkung (vgl. Kapitel 0) hinzukommen, darf eine Dehnung von 20 % nicht überschritten werden.

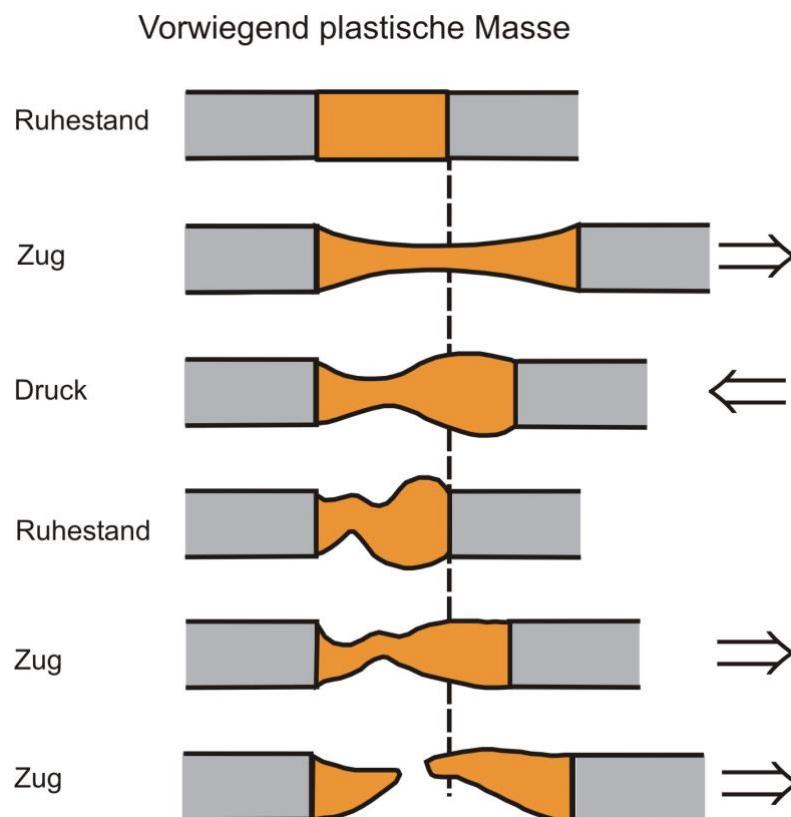
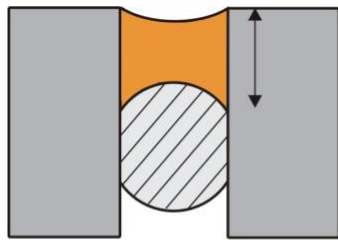
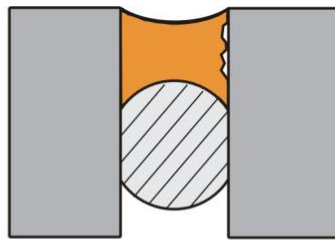


Bild 62: Kaugummi-Effekt an einer Fugendichtungsmasse mit hohem plastischem Anteil

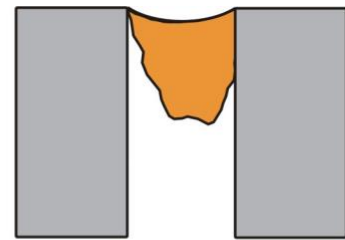
Wichtig für die Dehnbarkeit sind annähernd quadratische Verfüllquerschnitte und Zweiflankenhaftung (Bild 63).



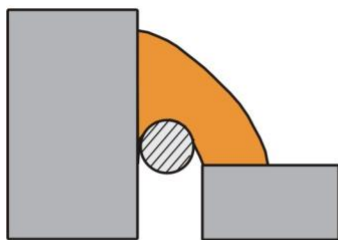
Richtig!
Hinterfüllung mit
Schaumstoffrundprofil
Große Haftflächen,
geringer Verbrauch.



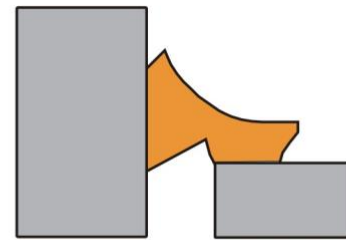
Falsch!
Kein Primerer-Voranstrich bei
saugenden Untergründen,
schlechte Haftung.



Falsch!
Keine Hinterfüllung,
keine Haftung.



Richtig!
Gedehnter Zustand mit
Schaumstoffrundprofil.



Falsch!
Im gedehnten Zustand entstehen
Abrisse.

Bild 63: Bewegungsfugen

9.5 Klebstoffe für tragende Konstruktionen

Als Kleber für Beton/Beton, Metall/Metall und Beton/Metall kommt in erster Linie EP in Frage. Da der Kleber auch in dickeren Schichten und an senkrechten Flächen nicht ablaufen darf, werden Harze höherer Viskosität verwendet, die zusätzlich noch mit Stellmitteln und inerten Bestandteilen, z. B. Quarzmehl gefüllt sein können.

EP-Harze sind wegen hoher Alkalibeständigkeit und geringem Reaktionsschwund für Klebungen im Betonbau besonders geeignet. Für die Vorbereitung des Untergrundes und Ausführung der Klebearbeiten sind dieselben Bedingungen zu beachten wie bei Beschichtungen (vgl. Kapitel 9.1.3).

Ein EP-System ist derzeit in Deutschland für Verklebungen zwischen Stahl und Beton bei vorwiegend ruhender Belastung (außen liegende Bewehrung) zugelassen. Brücken in Segmentbauweise und mit Stahllaschen verstärkte Brücken sind seit rund 25 Jahren bekannt.

10 Arbeits- und Umweltschutz

Ergänzende Hinweise für den Umgang mit Reaktionsharzen, Klebstoffen und Lösungsmitteln im Bauwesen: Während der Verarbeitung von Reaktionsharzen ist die Haut vor direktem Kontakt mit Harz und Härter zu schützen. Daneben sind Schutzbrillen und - wenn in mangelhaft entlüfteten Innenräumen gearbeitet wird - Schutzmasken zu tragen. Offene Flammen sind von den Gebinden fernzuhalten. Kopfschmerzen, in ernsteren Fällen Übelkeit oder Erbrechen weisen auf Vergiftungen durch Einatmen von Dämpfen hin. Bei mehrfachem Hautkontakt bzw. beim häufigen Einatmen können Allergien auftreten.

In ausgehärteter Form gelten Reaktionsharze bei Raumtemperatur beim Kontakt mit der Haut oder mit Wasser als physiologisch unbedenklich. Im Brandfall werden demgegenüber giftige und brennbare Pyrolysedämpfe abgespalten.

Beim Verarbeiten von lösungsmittelhaltigen und lösungsmittelfreien Klebstoffen und Lacken gelten ähnliche Richtlinien wie beim Mischen von Reaktionsharzansätzen. Bedingt durch die höhere Flüchtigkeit der meisten Lösungsmittel sind Zündquellen (offene Flammen) fernzuhalten. Unter Umständen sind in Innenräumen Atemschutzgeräte anzulegen. Besonders bei halogenhaltigen Kohlenwasserstoffen (Perchlor- bzw. Trichlorethylen) sowie bei Benzol und seinen Derivaten sind Atemschutzgeräte unbedingt einzusetzen, da diese Substanzen teilweise cancerogene Wirkungen haben.

Beim Umgang mit reinen Lösungsmitteln ist deren hohe Flüchtigkeit (besonders im Sommer!) und deren oft sehr niedriger Flamm- bzw. Zündpunkt zu beachten.

11 Literatur

- Lit 1: Benedix, R.: Bauchemie. Einführung in die Chemie für Bauingenieure. 3. Auflage, B.G. Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH, ISBN 3-519-20226-3, 2006
- Lit 2: Bibliographisches Institut & F.A. Brockhaus AG: Der Brockhaus multimedial 2006
- Lit 3: Blume, R.: Prof. Blumes Bildungsserver für Chemie. <http://www.chemieunterricht.de/dc2/auto/gum-herst.htm>, 2008
- Lit 4: Dimmig, A.: Baustoffe für den Bautenschutz und die Betoninstandsetzung. Vorlesungsfolien, F.A. Finger-Institut für Baustoffkunde, Weimar, 2003
- Lit 5: Ensinger: Ensinger kompakt. Technisches Know-how für den Kunststoffanwender. Firmenprospekt. www.ensinger-online.com, 2006
- Lit 6: Maurer Söhne: Maurer Topflager – Technische Informationen, Abmessungen und Gewichte. Firmenprospekt, 1999
- Lit 7: Rostásy, F. S.: Baustoffe. Verlag W. Kohlhammer, 1983
- Lit 8: Schießl, P.: Kunststoffe. Vorlesungsskript, Technische Universität München, 2004
- Lit 9: Schulte, K.: Grundlagen der Werkstoffkunde II. Polymerwerkstoffe. Vorlesungsfolien Arbeitsbereich Kunststoffe und Verbundwerkstoffe TU Hamburg-Harburg, 2004
- Lit 10: Taprogge, R.: Konstruieren mit Kunststoffen. VDI-Verlag, 1974
- Lit 11: Conversio 2024: Stoffstrombild Kunststoffe in Deutschland 2023. <https://plasticseurope.org/de/knowledge-hub/>, 10.01.2025
- Lit 12: Bendix, P. et al.: Circular economy for durable products and materials: the recycling of plastic building products in Germany - status quo, potentials and recommendations. *Journal of Material Cycles Waste Management* **24**, 1432–1443, 2022
- Lit 13: Verband Kunststoffherstellende Industrie e.V. (VKE): Foliensammlung Kunststoffe, 2003
- Lit 14: Wikipedia: Online-Enzyklopädie. www.de.wikipedia.org, 2006