

technisches Handbuch

SIMONA® Kunststoffe

GLOBAL THERMOPLASTIC SOLUTIONS

Zweiholm-Einstiegshilfe;
PE-Aufdopplung im Bereich
der Halter

Übergangsplatte

*Kunststoff – die wohl vielseitigste und bedeutungsvollste
Werkstoffgruppe des 20. und 21. Jahrhunderts, ohne die unsere
heutige Welt nicht funktionieren würde.
Kunststoffe lösen heute Probleme in den unterschiedlichsten
Bereichen, von Industrie und Technik über Fahrzeugbau und
Konsumgüter bis hin zur Medizintechnik.*

Inhalt

1	Vorwort	7			
2	Chemische Grundlagen der Kunststoffe	8			
2.1	Thermoplaste	8			
2.1.1	Amorphe Thermoplaste ohne Seitengruppen	11			
2.1.2	Amorphe Thermoplaste mit Seitengruppen	12			
2.1.3	Teilkristalline Thermoplaste	12			
2.1.4	Zusammenfassung Thermoplaste	13			
2.2	Duroplaste	14			
2.2.1	Ungesättigte Polyesterharze (UP)	14			
2.2.2	Epoxidharze (EP)	15			
2.2.3	Phenacrylatharze (PHA) oder Vinylesterharze (VE)	15			
2.2.4	Phenolharze (PF)	16			
2.3	Elastomere	16			
3	Allgemeine Beschreibung der SIMONA® Thermoplaste	17			
3.1	Polyethylen (PE)	17			
3.2	Polypropylen Homopolymer (PP-H)	18			
3.2.1	Isotaktisches Polypropylen	18			
3.2.2	Syndiotaktisches Polypropylen	18			
3.2.3	Ataktisches Polypropylen	19			
3.3	Polypropylen Copolymer (PP-C)	19			
3.4	Polyvinylchlorid (PVC-U)	20			
3.5	Nachchloriertes Polyvinylchlorid (CPVC)	21			
3.6	Polyvinylidenfluorid (PVDF)	21			
3.7	Ethylenchlortrifluorethylen (ECTFE)	22			
3.8	Ethylentetrafluorethylen (ETFE)	22			
3.9	Perfluoralkoxy Copolymer (PFA)	23			
3.10	Glykolmodifiziertes Polyethylenterephthalat (PETG)	24			
3.11	Polymilchsäure (PLA)	24			
3.12	Polyamide (PA)	25			
3.13	Polymethylmethacrylat (PMMA)	25			
3.14	Polycarbonat (PC)	25			
4	Werkstoffkennwerte	27			
4.1	PE	28			
4.2	PP	30			
4.3	PVC hart	31			
4.4	PVC geschäumt	32			
4.5	PETG, PVDF, ECTFE, PFA	33			
5	Physikalische Eigenschaften	34			
5.1	Mechanische Eigenschaften	34			
5.1.1	Mechanische Eigenschaften der Thermoplaste	38			
5.1.2	Der Zugversuch	39			
5.1.3	Der Biegeversuch	41			
5.1.4	Der Druckversuch	43			
5.1.5	Der Torsionsschwingversuch	43			
5.1.6	Der Ring- und Segmentscherversuch	44			
5.1.7	Der Stirnzugversuch	45			
5.1.8	Prüfung der Kerbschlagzähigkeit	46			
5.1.9	Prüfung der Schlagzähigkeit	46			
5.1.10	Oberflächenhärte	48			
5.1.10.1	Kugeldruckhärte H nach DIN EN ISO 2039-1	48			
5.1.10.2	Härte nach Shore D gemäß DIN EN ISO 868	48			
5.1.11	Verschleißigenschaften	48			
5.1.11.1	Der Sand-Slurry-Test	50			
5.2	Thermische Eigenschaften	51			
5.2.1	Wärmeleitung	51			
5.2.1.1	Wärmekapazität	52			
5.2.1.2	Wärmeleitfähigkeit	52			
5.2.2	Wärmedurchgang	52			
5.2.3	Wärmeausdehnung	53			
5.2.4	Prüfung der Wärmeformbeständigkeit	55			

5.3	Brandverhalten	55	9	Kunststoffphysik	77
5.3.1	Brandprüfung nach DIN 4102	55	9.1	Spannungsarten	77
5.3.2	SBI-Test nach DIN EN 13823	57	9.2	Verminderung der Eigenspannungen	79
5.3.3	Brandtest nach FM 4910	58	9.3	Wärmespannungen	80
5.3.4	Brandprüfungen nach UL 94	59	9.4	Einfluss von Orientierungen auf die Eigenschaften von Kunststoffen	84
5.4	Permeation	60	9.5	Schrumpf	84
5.5	Wasseraufnahme	61	9.6	Schwindung	85
5.6	Elektrische Eigenschaften	62	9.7	Einflüsse auf die Bauteilfestigkeit	85
5.6.1	Elektrische Leitfähigkeit	62	9.7.1	Kerbwirkung	85
5.6.2	Dielektrische Eigenschaften	62	9.7.2	Schweißen von Thermoplasten	86
5.6.3	Elektrische Durchschlagfestigkeit E_d nach DIN 53481 / VDE 0303-1	64	9.7.2.1	Verschweißbarkeit unterschiedlicher Werkstofftypen	86
5.6.4	Elektrische Kriechstromfestigkeit nach DIN 53480 / VDE 0303-1	64	9.7.2.2	Schweißverfahren	87
5.6.5	Elektrostatische Aufladung	64	9.7.2.3	Gestaltfestigkeit	88
			9.7.2.4	Lage von Schweißnähten	89
6	Chemische Eigenschaften	65	9.8	Spannungen	90
			9.9	Spannungsrisssbildung	93
7	Sonstige Eigenschaften	67	9.9.1	Eigenspannungen	94
7.1	Physiologische Unbedenklichkeit	67	9.10	Berechnung der zulässigen Kaltbiegeradien	95
7.1.1	Kontakt mit Lebensmitteln nach Europäischen Richtlinien	67	9.11	Alterung	96
7.1.2	Kontakt mit Trinkwasser	68	9.11.1	Alterungsprozesse durch Licht	96
7.2	Strahlenbeständigkeit	69	9.11.1.1	Photolyse	96
			9.11.1.2	Photooxidation	97
8	Langzeiteigenschaften	70	9.11.2	Sonstige Alterungsprozesse	97
8.1	Prüfverfahren	70	9.11.3	Prüfung der Alterung	97
8.1.1	Zeitstandzugversuch	70			
8.1.2	Zeitstandinnendruckversuch	70	10	Rechtliche Hinweise und Beratung	99
8.1.3	Full-Notch-Creep-Test (FNCT)	71			
8.1.4	Zeitstandkurven	71	11	Abbildungs-, Tabellen- und Literaturverzeichnis	100
8.1.5	Isochrone Spannungs-Dehnungs- Diagramme	74			
8.2	Statische Berechnungen	75			
8.3	Werkstoffe im prüfzeichenpflichtigen Behälterbau	76			

1 Vorwort

Kunststoff – ein Begriff, der unserer Tage durchaus mit unterschiedlichen Emotionen belegt wird: Einerseits im Zuge von Umweltschutzdiskussionen (Stichwort „marine littering“) als eher negative Entwicklung in unserer Zivilisation, andererseits als die wohl vielseitigste und bedeutungsvollste Werkstoffgruppe des 20. und 21. Jahrhunderts, ohne die unsere heutige Welt nicht funktionieren würde. Kunststoffe lösen heute Probleme in den unterschiedlichsten Bereichen, von Industrie und Technik über Fahrzeugbau und Konsumgüter bis hin zur Medizintechnik.

Dabei ist der Ursprung des Kunststoffes – also eines Stoffes, der kein natürliches Element, sondern ein künstlich hergestelltes Produkt ist – bereits Ausgang des 19. Jahrhunderts zu finden. Ob Naturkautschuk oder aus Zellulose hergestellte Derivate („Zelluloid“) – der, heute wieder durch intensives Marketing im Rahmen von Nachhaltigkeits- und Umweltschutzdiskussionen geprägte, „Biokunststoff“ war geboren. Später dann kamen weitere, auch heute noch gebräuchliche Massenkunststoffe hinzu, welche petrochemisch – also auf Mineralölbasis – hergestellt wurden und werden.

So wurde PVC bis Mitte der 20er Jahre im Labor entwickelt und erblickte erst ca. 1930 das industrielle Licht. Nach dieser Zeit wurden die ersten PVC-Rohre hergestellt. Mitte der 40er Jahre war dann die Geburtsstunde von Polyethylen und Polypropylen. In den 50er Jahren wurden daraus die ersten Industriegüter gefertigt. Die fluorierten Kunststoffe wie Teflon (PTFE) wurden ebenfalls in dem letztgenannten Zeitraum industriell eingesetzt. Den größten Boom jedoch erlebten die Kunststoffe nach dem zweiten Weltkrieg als wichtiger Grundpfeiler der fortschreitenden Industrialisierung. Dabei sind weder die Entwicklung spezieller Kunststoffe noch das Entdecken neuer Anwendungen für diese Werkstoffgruppe am Ende. Gerade für spezialisierte oder funktionalisierte Bauteile werden stets neue Werkstoffgruppen entwickelt und zur Serienreife gebracht.

Als Hersteller von thermoplastischen Kunststoffprodukten wie Halbzeugen, Rohren und Formteilen sowie Fertigteilen und Bauteilkomponenten sind auch wir bei der SIMONA AG ständig auf der Suche nach neuen Anwendungen und Produkten.

Die SIMONA AG wurde 1857 als lederverarbeitende Industrie der Gebrüder Simon gegründet. Unsere Firmengeschichte spiegelt die Entwicklung der Industriegesellschaft wider. Die Produktpalette wandelte sich infolge der veränderten weltwirtschaftlichen Bedingungen und der technischen Innovation grundlegend. Es vollzog sich ein Wechsel vom Naturstoff Leder hin zu hochwertigen Kunststoffhalbzeugen, die auf definierten, industriell hergestellten synthetischen Polymeren basieren.

Dieser Paradigmenwechsel im Unternehmen konnte nicht zuletzt deshalb erfolgreich gemeistert werden, weil wir als Pionier im Bereich der Kunststoffhalbzeuge gemeinsam mit unseren Kunden viele der heutigen Anwendungen entwickelt haben und immer noch weiterentwickeln. Unser Unternehmen hat sich an dieser Stelle also nicht nur durch eine hohe Material- und Verfahrenskompetenz, sondern auch durch eine hohe Detailkenntnis der jeweiligen Anwendungen sowie deren Auswirkungen und Zusammenhänge mit dem Material an sich ausgezeichnet. Im hier vorliegenden Handbuch haben wir diese Material- und Anwendungskompetenz zusammengefasst und wenden uns damit an Sie als unsere Kunden. Also an Personen, die sich – wie wir bei SIMONA – dem Werkstoff Kunststoff und dessen vielseitigsten und flexiblen Anwendungsmöglichkeiten verbunden fühlen und sich dadurch stets neu begeistern lassen können. Es soll Ihnen Nachschlagewerk, Schulungsunterlage und Ideengeber zugleich sein.

In diesem Sinne wünschen wir Ihnen viel Freude mit diesem Handbuch und freuen uns über jegliche Rückmeldungen Ihrerseits.

SIMONA AG

Technical Service Center/Anwendungstechnik

2 Chemische Grundlagen der Kunststoffe

Die Natur kennt zahlreiche Biopolymere, doch die heutzutage gebräuchlichen Kunststoffe sind Polymere, die synthetisch aus Erdöl, Erdgas und Kohle oder durch Umwandlung von Naturprodukten (z.B. Zucker etc.) hergestellt werden. Sie sind als organische Verbindungen definiert, die aus Makromolekülen mit einer Molekülmasse von $> 10^4$ u ($1 \text{ u} = 1/12$ der Masse von ^{12}C) aufgebaut sind. Makromoleküle sind dabei aus Einzelbausteinen, den Monomeren, zusammengesetzt. Für die Makromoleküle werden auch die Bezeichnungen Oligomere und Polymere verwendet, die sich durch ihre Molmassen bzw. Kettenlängen unterscheiden:

Oligomere = 1.000 – 10.000

Polymere = > 10.000

Die obige Definition ist derart allgemein, dass sogar viele natürliche Werkstoffe zu den Kunststoffen gehören. Hierzu zählen Holz, Leder, Baumwolle, Wolle, Hanf, Seide uvm., die teilweise seit Menschengedenken als Werkstoffe genutzt werden. Weiterhin muss zwischen biologischen und synthetischen Polymeren unterschieden werden. Die meisten Biopolymere basieren auf Polysacchariden, also Vielfachzuckern, wohingegen synthetische Kunststoffe zum großen Teil auf der Fähigkeit des Kohlenstoffatoms, homöopolare Bindungen (Atombindungen) zu bilden, basieren. Diese Bindungsart kann hochgradig stabil sein, wie das Beispiel des Diamanten zeigt, bei dem ausschließlich Kohlenstoffatome im Gitter angeordnet sind. Kunststoffe bestehen in der Regel aus Kohlenstoff und Wasserstoff, welche jedoch auch durch andere Elemente wie Sauerstoff, Stickstoff oder Halogene ersetzt werden können.

Wie oben bereits erwähnt, erfolgt die systematische Einteilung der Kunststoffe anhand der Monomere, aus

denen sie zusammengesetzt sind. Zusätzlich unterteilt man die verschiedenen Kunststoffe anhand ihrer temperaturabhängigen mechanischen Eigenschaften in Thermoplaste, Elastomere und Duroplaste.

2.1 Thermoplaste

Thermoplaste bestehen aus langgestreckten Polymeren, die durch sogenannte „van der Waalssche Bindungen“ untereinander verbunden sind. Diese rein physikalischen Bindungen beruhen auf der Wechselwirkung von elektrischen Dipolen, so wie sich entgegengesetzte magnetische Pole anziehen und gleichartige Pole abstoßen. Die Stärke, oder genauer ausgedrückt, die Energie der Bindung hängt in diesem Fall von der Polarität der Makromoleküle ab. Allgemein bezeichnet man diese Wechselwirkungen als Dispersionskräfte, die in London-, Debye- und Keesomkräfte unterschieden werden und deren Bindungsenergie in der genannten Reihenfolge ansteigt. Die Bindungsenergie W ist dabei umgekehrt proportional der sechsten Potenz des Abstands r der Moleküle zueinander:

$$W \sim r^{-6}.$$

Die van der Waalsschen Kräfte sind eine Sonderklasse der Keesomkräfte, wobei die Wasserstoffbrückenbindung wiederum zu den van der Waalskräften zählt. Qualitativ kann die Bindungsenergie durch die Schmelztemperatur, die Zugfestigkeit oder den Elastizitätsmodul, der jedoch im energieelastischen Bereich liegen muss, charakterisiert werden. Aufgrund der rein physikalischen Bindung können die einzelnen Makromoleküle bei genügender Wärmezufuhr aneinander abgeschert werden, ohne dass der Verband zerstört wird. Der Thermoplast erweicht und schmilzt bei höheren Temperaturen. Dieser

rein physikalische Prozess ist reversibel, so dass es möglich ist, Thermoplaste miteinander zu verschweißen. Die mechanischen und chemischen Eigenschaften erreichen in der Schweißnaht nahezu die des Grundmaterials. Beim Schweißprozess treten jedoch geringe Abbaumechanismen auf, die sich aber basierend auf langjährigen Erfahrungen nicht negativ auf die Standfestigkeit auswirken.

Thermoplaste werden in amorph und teilkristallin unterschieden. Die amorphen Thermoplaste besitzen ein Gefüge, in dem die Molekülketten nahezu ungeordnet (amorph) verteilt sind (Abbildung 1).

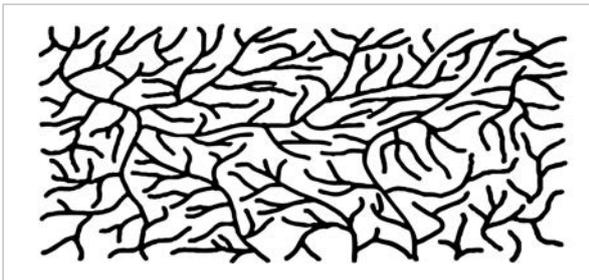


Abbildung 1: Strukturmodell eines amorphen Thermoplasts

Teilkristalline Thermoplaste besitzen dagegen Bereiche, in denen sich die Molekülketten parallel angeordnet haben (kristalline Bereiche) (Abbildung 2). Diese Bereiche wiederum trennen amorphe Gebiete. Thermoplaste kristallisieren in der Regel derart, dass sich die Kristallite in Überstrukturen, den Sphäroliten, anordnen. Solche Kristallite haben eine höhere Dichte und Ordnung als die amorphen Bereiche. Mit steigender Kristallinität sinkt die Transparenz. Der Kunststoff wird tranzluzent (opak, durchscheinend).

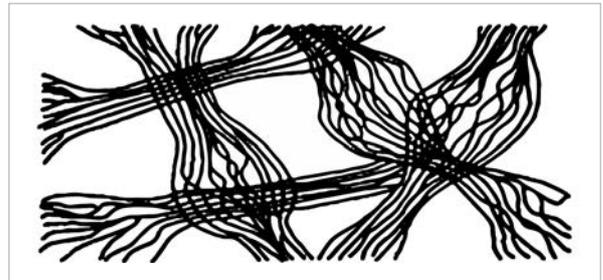


Abbildung 2: Strukturmodell eines teilkristallinen Thermoplasts

In der Industrie werden unterschiedlichste Thermoplaste in Abhängigkeit von der Anwendung eingesetzt. Die folgende Tabelle (Tabelle 1) soll einen Überblick über die wichtigsten Thermoplaste und deren Monomere vermitteln.

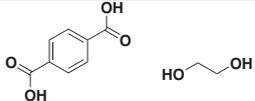
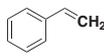
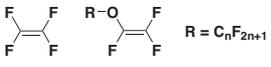
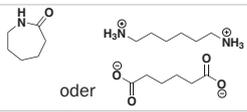
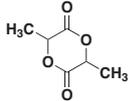
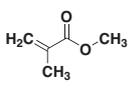
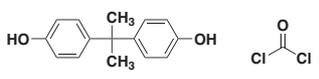
Kunststoff	Monomer	Monomerformel
Polyethylen (PE)	Ethylen	$\text{H}_2\text{C}=\text{CH}_2$
Polypropylen (PP)	Propylen	$\text{H}_2\text{C}=\text{CH}-\text{CH}_3$
Polyvinylidenchlorid (PVDC)	Vinylidenchlorid	$\text{H}_2\text{C}=\text{C}(\text{Cl})_2$
Polyvinylidenfluorid (PVDF)	Vinylidenfluorid	$\text{H}_2\text{C}=\text{C}(\text{F})_2$
Polyvinylchlorid (PVC)	Vinylidenchlorid	$\text{H}_2\text{C}=\text{CH}-\text{Cl}$
Polyethylenterephthalat-Glykol-modifiziert (PETG)	Terephthalsäure & Ethylenglycol	
Polystyrol (PS)	Styrol	
Ethylen-Chlortrifluorethylen (ECTFE)	Ethylen & Chlortrifluorethylen	$\text{H}_2\text{C}=\text{CH}_2$ 
Ethylen-Tetrafluorethylen (ETFE)	Ethylen & Tetrafluorethylen (TFE)	$\text{H}_2\text{C}=\text{CH}_2$ 
Perfluoralkoxy-Polymere (PFA)	Copolymer aus TFE und Perfluoralkoxyvinylether	 $\text{R} = \text{C}_n\text{F}_{2n+1}$
Polyamid 6 (PA6 – „Perlon“) oder Polyamid 6.6 (PA6.6 – „Nylon“)	ϵ -Caprolactam oder Hexamethyldiamin (HMD) und Adipinsäure (als AH-Salz)	
Polylactid (PLA)	Milchsäureanhydrid	
Polymethylmethacrylat (PMMA, auch „Acrylglas“ oder „Plexiglas“)	Methacrylsäuremethylesters (MMA)	
Polycarbonat (PC, auch „Makrolon“)	Bisphenol A und Phosgen	

Tabelle 1: Auswahl an Thermoplasten und die (möglichen) zugehörigen Monomere

Alkene mit der Summenformel C_nH_{2n} werden auch als Olefine bezeichnet und die daraus gebildeten Makromoleküle als Polyolefine. Aus Tabelle 1 gehören somit lediglich Polyethylen und Polypropylen zu den Polyolefinen. Die in Tabelle 1 angegebenen Monomere reagieren miteinander, indem die Doppelbindung aufgebrochen wird und somit die C-Atome, die zuvor durch eine Doppelbindung miteinander verbunden waren, jeweils eine freie Valenz (Bindung) bilden, an die sich weitere Monomere anlagern können. Dieser Vorgang wird auch als Polymerisation und die entstandenen Makromoleküle als Polymere bezeichnet.

Durch diesen Reaktionsmechanismus ist auch verständlich, dass sich aus den Monomeren in der Regel unverzweigte Makromoleküle bilden, die im Verband aufgrund der unterschiedlichen physikalischen Wechselwirkungen geordnet oder ungeordnet vorliegen können. Liegt eine Ordnung vor, d.h. sind die Moleküle parallel angeordnet, so spricht man von einer Kristallinität. Sie liegt in vielen Fällen nicht im gesamten Werkstück vor, so dass es sich hier um einen teilkristallinen Werkstoff handelt. Die Höhe der Kristallinität wird durch den Einbau von Seitenketten oder -molekülen stark beeinflusst. In solchen Fällen wird häufig ein teilkristalliner Thermoplast gebildet. Weiterhin kann die Kristallisation durch den Einbau von Fremdmonomeren in der Kette (Copolymerisation) vollständig verhindert werden. Ein Beispiel hierfür ist das aus Ethylen und Propylen aufgebaute Copolymerisat EPDM, das durch den Einbau von 30 % Propylen amorph (nicht kristallin) erstarrt.

In der industriellen Technik werden obige Thermoplaste noch durch den Herstellungsprozess sowie die Kombination mit Fremdmonomeren und Weichmachern modifiziert. Polyethylen existiert z.B. als PE-LD (Low Density), PE-HD

(High Density) und PE-UHMW (Ultra High Molecular Weight).

PE-LD wird im Hochdruckverfahren bei 1.000 – 3.000 bar und 150 – 300 °C hergestellt, wobei stark verzweigte Ketten gebildet werden.

PE-HD entsteht im Mitteldruckverfahren durch Lösemittelpolymerisation in Xylol bei 150 – 180 °C und einem Druck von etwa 35 bar als weitgehend lineare Ketten.

PE-UHMW wird im Niederdruckverfahren mit Zieglerkatalysatoren bei 20 – 150 °C und 2 – 50 bar zu nahezu unverzweigten linearen Ketten hergestellt.

2.1.1 Amorphe Thermoplaste ohne Seitengruppen

Die amorphen Thermoplaste bestehen aus ungeordneten Molekülketten als räumliche Struktur. Dieses Gefüge beeinflusst entscheidend die Eigenschaften des Werkstoffes. Er ist unter anderem transparent und zeigt beim thermischen Verarbeiten aufgrund fehlender (Nach-) Kristallisation weniger Schrumpf und Schwindung als ein teilkristalliner Werkstoff. Ein amorpher Thermoplast (Abbildung 1) wird unterhalb der Glasübergangstemperatur T_g eingesetzt. Hier verhält sich dieser Werkstoff linear-elastisch. Mit weiter abnehmender Temperatur reagiert der Thermoplast sehr schlagempfindlich. Oberhalb von T_g fängt der amorphe Thermoplast an stark zu fließen und verliert seine Gebrauchseigenschaften.

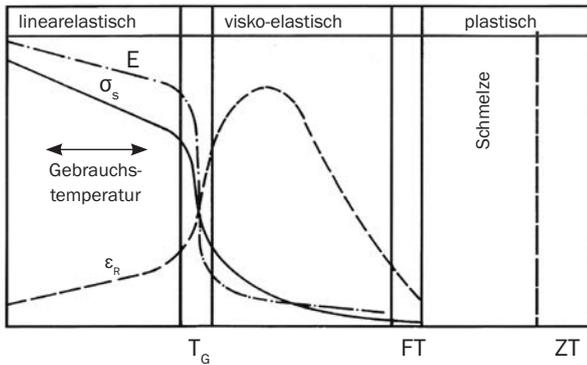


Abbildung 3: Mechanische Eigenschaften amorpher Thermoplaste

- E = Elastizitätsmodul
- T_G = Glasübergangstemperatur
- σ_s = Streckspannung
- ϵ_R = Reißdehnung
- FT = Fließtemperaturbereich
- ZT = Zersetzungstemperaturbereich

Für PVC-U liegt die Gebrauchstemperatur zwischen 0 °C und 60 °C. Die Verarbeitung, wie beispielsweise die Umformung, erfolgt in der Regel oberhalb von T_G . Im Temperaturbereich über dem Fließtemperaturbereich beginnt der Thermoplast zu schmelzen. Dieser Temperaturbereich wird zur Verschweißung genutzt.

Typische amorphe Thermoplaste aus dem SIMONA® Halbzeugprogramm:

- SIMONA® PVC-CAW
- SIMOPOR-LIGHT/-ULTRALIGHT
- SIMONA® COPLAST-AS/-AS-X
- SIMONA® PVC-GLAS
- SIMOLUX

2.1.2 Amorphe Thermoplaste mit Seitengruppen

Diese Werkstoffgruppe weist im Gegensatz zur vorherigen schon bei sehr tiefen Temperaturen den Glaszustand auf. Aufgrund des molekularen Aufbaus oder durch den Zusatz geeigneter Additive ergeben sich oberhalb der Glasübergangstemperatur zwei aufeinanderfolgende Bereiche, in denen diese Werkstoffe unterschiedlichen Anwendungen ausgesetzt werden können.

1. Nebenrelaxationsbereich:

Die Seitengruppen werden beweglich und die Werkstoffe somit zäher. Dies ist der eigentliche Temperatureinsatzbereich. Die mechanischen Eigenschaften verändern sich nur geringfügig.

2. Hauptrelaxationsbereich:

Die amorphen Bereiche erweichen und der Werkstoff geht in den thermoplastischen Zustand über.

Typische Werkstoffe aus dem SIMONA® Halbzeugprogramm sind die schlagzäheren Materialien:

- SIMONA® PVC-MZ-COLOR
- SIMONA® PVC-GLAS-SX

2.1.3 Teilkristalline Thermoplaste

Teilkristalline Materialien besitzen vom strukturellen Aufbau her teilweise parallel angeordnete Molekülketten (kristalline Bereiche) und solche mit räumlicher Filzstruktur (amorphe Bereiche) (Abbildung 2). Diese vollkommen gegensätzlichen Strukturen führen zu unterschiedlichen Verhaltensweisen bei wechselnden Temperaturen, so dass auch bei diesem Werkstoff die Bezeichnungen Haupt- und Nebenrelaxationsbereich ihre Berechtigung

finden. Im Gegensatz zu amorphen Thermoplasten mit Seitengruppen oder den Copolymeren (Polymerisation verschiedener Monomere zum Erreichen bestimmter Eigenschaften) liegt die Einsatztemperatur zwischen Haupt- und Nebenrelaxationsbereich. Bei sehr tiefen Temperaturen (im Glaszustand) sind die teilkristallinen Thermoplaste spröde und damit schlagempfindlich. Im Nebenrelaxationsbereich dagegen erweichen die amorphen Anteile, so dass der Werkstoff im Einsatztemperaturbereich zähelastisch wird. Die Vorteile dieses Materials ergeben sich aus dem zähen Verhalten durch erweichte amorphe Anteile und der gleichzeitig vorhandenen Steifigkeit und Härte durch eingefrorene kristalline Anteile.

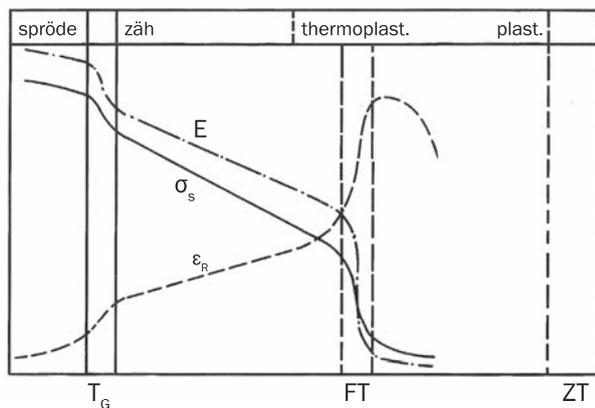


Abbildung 4: Mechanische Eigenschaften teilkristalliner Thermoplaste

E = Elastizitätsmodul

T_G = Glastemperatur

σ_s = Streckspannung

ϵ_R = Reißdehnung

FT = Fließtemperaturbereich

ZT = Zersetzungstemperaturbereich

Im Hauptrelaxationsbereich, dem Kristallitschmelzbereich, erweichen auch die kristallinen Anteile. Mit steigender Temperatur geht der Werkstoff in den Schmelzzustand über und wird plastisch.

Typische Werkstoffe aus dem SIMONA® Halbzeugprogramm:

- SIMONA® PE-HD
- SIMONA® PE 100
- SIMONA® PP-H AlphaPlus® / SIMONA® PP-H natur
- SIMONA® PVDF
- SIMONA® ECTFE

2.1.4 Zusammenfassung Thermoplaste

Wie aus den vorausgegangenen Kapiteln ersichtlich, hat die Molekulanordnung einen hohen Einfluss auf die grundlegenden Eigenschaften der jeweiligen Werkstoffgruppe. Nachfolgend ein Vergleich der markantesten Wesensmerkmale:

Amorphe Thermoplaste haben eine

- höhere Festigkeit
- höhere Steifigkeit
- höhere Oberflächenhärte
- höhere Oberflächengüte
- geringere Wärmedehnung
- geringere Verzugsneigung

Teilkristalline Werkstoffe dagegen haben eine

- höhere Dehnfähigkeit
- höhere Schlagzähigkeit

Es ist anzumerken, dass die Eigenschaften und das Verhalten von Kunststoffen wie Thermoplasten stark von den verwendeten Additiven beeinflusst werden. Die obengenannten Eigenschaften sind insoweit als wertfrei anzusehen, weil ihre Beurteilung anwendungs- und produktabhängig ist. Dazu sollen die nachfolgenden Kapitel weitere Informationen vermitteln.

2.2 Duroplaste

Duroplaste entstehen aus niedermolekularen Reaktionsharzen, die bei der Zugabe von chemischen Verbindungen (Härtern), Zufuhr von Wärme, Druck oder Lichtenergie irreversibel miteinander chemisch zu einem dreidimensionalen Netzwerk reagieren (Abbildung 5).

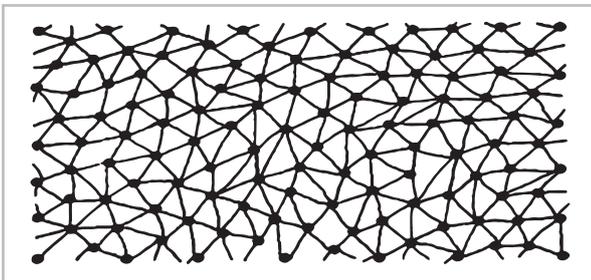


Abbildung 5: Strukturmodell eines Duroplasts

Diese Reaktion wird auch als Vernetzungsreaktion bezeichnet. Als Ausgangsstoff verwendet man in der Regel lineare, niedermolekulare Reaktionsharze, die zusätzliche reaktive Gruppen oder Doppelbindungen enthalten und somit weiter reagieren können (vernetzen).

Aufgrund der chemischen Bindungen in vernetzten Duroplasten können sie im Gegensatz zu den thermoplastischen Werkstoffen nicht geschmolzen und auch nicht miteinander verschweißt werden. Sie werden daher in unterschiedlichsten Industriezweigen eingesetzt. Man

unterscheidet bei den Duroplasten u.a. zwischen ungesättigten Polyesterharzen, Epoxidharzen, Phenacrylatharzen, Phenolharzen, Furanharzen und Melaminharzen.

2.2.1 Ungesättigte Polyesterharze (UP)

Ungesättigte Polyesterharze werden in der Regel durch eine Schmelzkondensation aus ungesättigten bi- oder polyfunktionellen Carbonsäuren oder deren Anhydriden, gesättigten Dicarbonsäuren und Dialkoholen gebildet. Die Doppelbindungen der ungesättigten Carbonsäuren verbleiben in den kondensierten Harzen als reaktive Stellen für die spätere Vernetzung. Die gesättigten Säureverbindungen regulieren die Kettenlänge, die Reaktivität und die physikalischen wie auch chemischen Eigenschaften des Duroplastes. Der Name Polyester bezieht sich auf die Estergruppen in den Makromolekülen.

Unterschiedliche Säuren und Dialkohole sind von besonderem technologischem Interesse. Die Wahl der einzelnen Komponenten hängt stark von den gewünschten mechanischen und chemischen Eigenschaften des gehärteten Polyesters ab. Die einzelnen Komponenten können der Literatur entnommen werden [2].

Die Namensgebung der einzelnen Polyester schließt häufig den Namen des Glykols und/oder der Carbonsäure mit ein. So existieren o-Phthalsäure-Polyester, Bisphenol-A-Polyester oder auch Terephthalsäure-Polyester, um nur einige Beispiele zu nennen.

Die Polyester liegen meist zähflüssig oder fest vor und werden daher für die weitere Verarbeitung in Lösemitteln (z.B. Styrol) gelöst, die ebenfalls eine Doppelbindung enthalten. Die linearen Polyesterketten werden dann über Monomere, die gleichzeitig als Lösemittel für diese

Harze dienen, miteinander vernetzt. Bei der Wahl der Monomere muss darauf geachtet werden, dass der Polyester darin gut löslich ist und die Geschwindigkeit der Selbstpolymerisation des reaktiven Lösemittels (Reaktivverdünner) geringer ist als die Copolymerisation mit dem UP-Harz. Das technologisch wichtigste Lösemittel ist Styrol.

Es können aber auch andere Reaktivverdünner eingesetzt werden, wie beispielsweise Methylmethacrylat, Diallylphthalat oder Triallylcyanurat, die jedoch dann andere Eigenschaften der Polyester Mischung und des ausgehärteten Polyesters bewirken. Die Polymerisation von ungesättigten Polyestern wird durch Radikale ausgelöst, die von organischen Peroxiden geliefert werden. Die Peroxide zerfallen in der Wärme oder durch Beschleuniger katalysiert auch bei Raumtemperatur zu Radikalen, die die vorhandenen Doppelbindungen des Reaktivverdünners und des Polyesters öffnen. In der Industrie wird als Härter häufig das Methylethylketonperoxid (MEKP) verwendet.

Die bei der Reaktion freiwerdende Energie in Form von Wärme unterstützt die Radikalbildung. Die dabei entstehende Temperatur kann bis über 200 °C betragen und in extremen Fällen sogar zur Zerstörung des Polyesters führen, wenn die Reaktionswärme nicht genügend schnell abgeführt wird.

2.2.2 Epoxidharze (EP)

Epoxidharze werden aus Epoxiden mit funktionellen Gruppen und Verbindungen aufgebaut, die sich durch die katalytische Abgabe von Wasserstoff (aktiv) an die Epoxidgruppe mit dem Epoxid in einer Additionsreaktion verbinden (Abbildung 6).

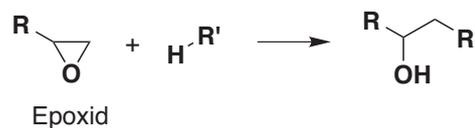


Abbildung 6: Additionsreaktion eines Epoxids

Die Härtung eines Epoxidharzes erfolgt durch eine Polyadditionsreaktion, wobei die Polymerisation der Epoxidgruppen von untergeordneter Bedeutung ist. Als Härter werden Carbonsäureanhydride und Polyamine verwendet. Die Härter werden dabei in der Regel in das fertige Produkt eingebaut, so dass die Dosierung des Härters im äquimolaren Verhältnis bezüglich der reaktiven Gruppen von Harz und Härter vorgenommen wird [2].

Da Epoxidharze häufig hochviskos sind, werden zur besseren Verarbeitung reaktive Verdünner zugesetzt, die selbst Epoxidgruppen besitzen und somit an der Vernetzungsreaktion teilnehmen können. Somit werden die Eigenschaften eines Epoxidharzes ganz entscheidend von dem Härter und dem verwendeten Reaktivverdünner mitbestimmt.

2.2.3 Phenacrylatharze (PHA) oder Vinylesterharze (VE)

Vinylesterharze werden aus einem Epoxidharz und einer ungesättigten organischen Säure gebildet. Sie werden heute auch als Phenacrylatharze bezeichnet.

Die reaktiven Doppelbindungen befinden sich im Gegensatz zu den UP-Harzen nur an den Enden des Moleküls. Dadurch findet in der Regel eine schnelle und vollständige Reaktion mit den Copolymeren während der Härtung statt. Dies bewirkt weiterhin, dass ein chemischer Angriff durch Hydrolyse oder durch Spaltung von restlichen C=C-

Doppelbindungen infolge von Oxidation oder Halogenierung von untergeordneter Bedeutung ist. Daher sind ausgehärtete Vinylesterharze widerstandsfähiger gegen einen chemischen Angriff als ungesättigte Polyesterharze oder auch Epoxidharze.

Ein weiterer Vorteil liegt in den sekundären Hydroxylgruppen im Vinylesterharz begründet, die mit silikatischen Füllstoffen und Glas wechselwirken können und somit eine erhöhte mechanische Festigkeit im Verbund mit Glasfasern aufweisen.

Vinylesterharze mit einer höheren Wärmeformbeständigkeit werden aus epoxierten Novolaken, Acrylsäure und/oder Methacrylsäure hergestellt [2].

Als Monomer für die Vernetzung wird in der Regel, analog zu den ungesättigten Polyesterharzen, Styrol verwendet, in dem das Phenacrylatharz gelöst ist. Es können aber auch andere Monomere mit einer Doppelbindung wie bei den UP-Harzen verwendet werden. Die Härtung der VE-Harze erfolgt analog der der UP-Harze durch Wärme, Peroxide oder Strahlung, die zur Bildung freier Radikale führt. Als Peroxid wird häufig Methylethylketonperoxid (MEKP) und als Beschleuniger Cobaltoctoat und Amine wie Dimethylanilin eingesetzt.

2.2.4 Phenolharze (PF)

Phenolharze oder auch Phenoplaste sind als Kunstharze definiert, die durch die Kondensation von Phenolen, Phenolabkömmlingen und Aldehyden gebildet werden. Wichtige phenolische Ausgangsprodukte sind neben Phenol ortho-, meta- und para-Kresol (Methylphenol), Xylenole, Alkylphenole, Arylphenole und Resorcin.

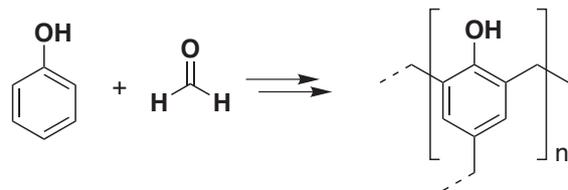


Abbildung 7: Syntheschema einer Methylenphenolgruppe als Strukturelement bei einem klassischen Phenoplast aus Phenol und Formaldehyd

Als Aldehyd wird industriell vorwiegend Formaldehyd oder Paraformaldehyd eingesetzt. Die Härtung erfolgt je nach Art des Phenolharzes in der Wärme ($\geq 140\text{ °C}$) oder durch Zugabe eines sauren oder alkalischen Katalysators (Kalthärtung).

2.3 Elastomere

Elastomere sind im Gegensatz zu Duroplasten nur schwach vernetzt. Sie sind nicht schmelzbar, aber schon bei tiefen Temperaturen dehnbar und elastisch verformbar. Elastomere wie Natur- und Silikonkautschuk sowie synthetische Elastomere wie z.B. Polyisobutylen finden unter anderem Anwendung als Reifen oder Dichtungen.

Im folgenden Verlauf werden nur noch Thermoplaste beschrieben.

3 Allgemeine Beschreibung der SIMONA® Thermoplaste

3.1 Polyethylen (PE)

Polyethylen weist von allen Kunststoffen die einfachste Molekülstruktur auf, und zwar durch die Aneinanderreihung von CH₂-Segmenten.

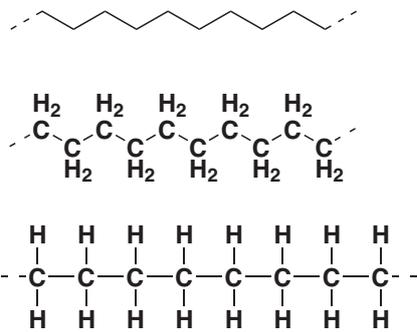


Abbildung 8: Verschiedene schematische Darstellungsweisen für Polyethylen

Abhängig vom Herstellungsverfahren kann Polyethylen hoher und niedriger Dichte hergestellt werden. Beide unterscheiden sich in der Anzahl der Verzweigungen (Abbildung 9 und Abbildung 10).



Abbildung 9: PE hoher Dichte

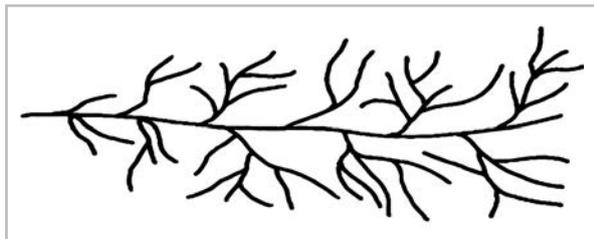


Abbildung 10: PE niedriger Dichte

Diese Verzweigungen spiegeln den Grad der Kristallinität wieder, d.h. je geringer deren Anzahl, desto höher die Kristallinität. Gleichzeitig bedeutet jedoch eine steigende Kristallinität eine höhere Dichte und einen höheren Kristallitschmelzbereich.

	Kristallinität %	Dichte g/cm ³	Schmelzbereich °C
PE-LD	40 - 50	0,92 - 0,94	130 - 145
PE-HD	60 - 80	0,95 - 0,97	130 - 145

Tabelle 2: Kenndaten von PE

Zur Beurteilung von Verhaltensweisen verschiedener Polyethylene wird die Kettenlänge eines Moleküls mit dem daraus resultierenden mittleren Molekulargewicht M (Summe der Atomgewichte aller in einem Molekül enthaltenen Atome) herangezogen.

Es ist anzumerken, dass es verschiedene Methoden gibt, das Molekulargewicht zu bestimmen (z.B. Lichtstreuung, Osmose, Viskosität, rechnerisch nach Margolies). Diese verschiedenen Verfahren können jedoch unterschiedliche Molmassen bei gleichem Werkstoff ergeben.

	M möglich	M technisch gebräuchlich
PE-LD	5.000 - 50.000	20.000 - 50.000
PE-HD	6.000 - 4.000.000	ca. 100.000
PE-HMW	500.000 - 1.000.000	500.000
PE-UHMW	> 1.000.000	ca. 4.500.000 - 10.500.000

Tabelle 3: Molekulargewicht in g/mol

M < 10.000 = wachsartig

Abkürzungserklärung:

- LD = Low Density
- HD = High Density
- HMW = High Molecular Weight
- UHMW = Ultra High Molecular Weight

3.2.3 Ataktisches Polypropylen

Die CH₃-Gruppen folgen in ihrer räumlichen Lage zur Hauptkette keiner Regel.

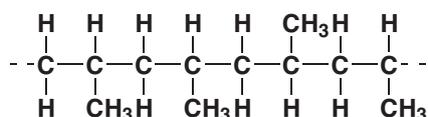


Abbildung 15: Schematische Darstellung eines ataktischen PP

Für die technischen Anwendungen ist das isotaktische PP als vorrangig anzusehen, da mit steigender Isotaktizität eine Zunahme von Kristallinitätsgrad, Schmelzpunkt, Zugfestigkeit, Steifigkeit und Härte erfolgt. SIMONA® PP-H natur und PP-H AlphaPlus® Halbzeuge bestehen aus diesem Grunde aus isotaktischem PP.

Im Vergleich zu Polyethylen sind die Eigenschaften von Polypropylen trotz ähnlicher Molekularstruktur unterschiedlich:

- niedrigere Dichte (0,91 g/cm³)
- höhere Glas temperatur
- höhere Schmelztemperatur und dadurch höhere Formbeständigkeit in der Wärme
- PP-Homopolymerisate sind in der Kälte spröde, Copolymerisate mit Ethylen dagegen schlagzäh

Die Eigenschaften von Polypropylen können durch eine kontrollierte Kristallisation beeinflusst werden. PP-Homopolymere kristallisieren bevorzugt in der Form von Alpha-(α-) Sphäroliten (kugelförmige Kristalle). Die Zugabe von Nukleierungsmitteln (Kristallkeimbildner) ermöglicht eine kontrollierte, gleichmäßigere α-Kristallstruktur oder die Bildung von Beta- (β-) Sphäroliten. α-nukleiertes PP zeigt auch bei hohen Temperaturen eine sehr gute Steifigkeit

(hoher E-Modul), wohingegen β-nukleiertes PP flexibler ist und eine erhöhte Schlagzähigkeit aufweist. SIMONA bietet mit SIMONA® PP-H AlphaPlus® standardmäßig ein α-nukleiertes PP an.

SIMONA® Kunststoffhalbzeuge aus PP werden vielfach im chemischen Apparatebau, hauptsächlich im Inneneinsatz, bei Temperaturen zwischen 0 °C und 100 °C eingesetzt. Dabei wird gerade im oberen Temperaturbereich eine höhere Steifigkeit gewünscht, welche durch den Einsatz eines Homopolymers erbracht werden kann.

3.3 Polypropylen Copolymer (PP-C)

Für manche Anwendungen ist es erforderlich, einen Kunststoff anzubieten, welcher im Vergleich zu Polyethylen einen erhöhten Temperatureinsatz bietet, gleichzeitig aber weniger steif ist als ein Polypropylen Homopolymer. In diesem Fall kommen Polypropylen Copolymer Typen zum Einsatz. Hierbei unterscheiden wir zwischen PP-Blockcopolymeren (PP-B), welche aus zwei bzw. mehreren großen Blöcken aus PP und PE zusammengesetzt sind, und PP-Randomcopolymeren (PP-R), welche aus Propylen- und Ethylenmonomeren in zufälliger Reihenfolge aufgebaut sind.

PP-B und PP-R weisen besonders bei niedrigen Temperaturen unter 5 °C ein zäheres Verhalten auf. Sie besitzen jedoch insbesondere bei Temperaturen über 60 °C eine geringere Steifigkeit als PP-H.

Die bei SIMONA erhältlichen SIMONA® PP-C Halbzeuge sind blockcopolymer PP-Typen (PP-B). Zudem umfasst unser Produktprogramm Platten, Schweißdrähte, Formteile und Armaturen aus SIMONA® PP-R. Unter bestimmten Voraussetzungen (v.a. unter Beachtung des

Schmelzindexbereiches oder Füllstoffanteiles) kann PP-H mit PP-B oder PP-R kombiniert bzw. verschweißt werden.

Darüber hinaus gibt es weitere Konstitutionsmöglichkeiten eines Copolymers, wie z.B. alternierende Copolymere oder Pfropfcopolymere. Neben PP-C sind Acrylnitril-Butadien-Styrol (ABS), Styrol-Acrylnitril (SAN) oder Butylkautschuk technisch weit verbreitete Copolymere.

3.4 Polyvinylchlorid (PVC-U)

PVC-U ist ein Homopolymer mit wenig verzweigten Makromolekülketten mit der Molmasse M zwischen 40.000 und 150.000.

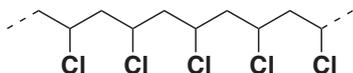


Abbildung 16: Schematische Darstellung von PVC-U

Die seitlichen Chloratome stehen räumlich ungeordnet (ataktisch) an den Molekülketten. Die großen Chloratome verhindern eine Parallel-Lagerung der Hauptketten. Eine Kristallisation ist somit nicht möglich. Dies erklärt die amorphe Molekülstruktur.

Je nach Herstellungsverfahren des PVC unterscheidet man zwischen drei Polymerisationstypen:

1. Masse-Polymerisat (M-PVC)

Bei einer Substanz- oder Massepolymerisation wird das Vinylchlorid mit einem Initiator versehen und ohne ein Lösungsmittel polymerisiert. Aufgrund des geringen Gehaltes an Polymerisationshilfsmitteln wird eine sehr hohe Reinheit erreicht. Daher kann ein solches PVC-U zur Herstellung von optisch hochwertigen Endprodukten verwendet werden.

2. Suspensions-Polymerisat (S-PVC)

Wird das Monomer in einem nicht mischbaren Medium (oft Wasser) dispergiert und ein monomerlöslicher Initiator zugesetzt, spricht man von Suspensionspolymerisationen. Die Polymerisation findet in den dispergierten Monomertröpfchen statt. Das Endprodukt ist transparent, universell einsetzbar und besitzt gute elektrische Isolareigenschaften.

3. Emulsions-Polymerisat (E-PVC)

Im Gegensatz zur Suspensionspolymerisation werden bei der Emulsionspolymerisation ein wasserlöslicher Initiator und Emulgatoren zugesetzt. Daher kann es zu einer Trübung aufgrund des bei der Polymerisation notwendigen Emulgatorgehaltes kommen. Bei Lagerung kann es zu einer Feuchtigkeitsaufnahme kommen, die sich negativ auf die elektrischen Isolareigenschaften auswirkt.

PVC wird, ebenso wie die Polyolefine, als Homo- und Copolymerisat hergestellt. Die gebräuchlichen Copolymerisatkomponenten sind Vinylacetat und Acrylnitril. Copolymerisate sind zäher, flexibler und schlagunempfindlicher als Homopolymerisate.

Da reines PVC kein ausgewogenes Eigenschaftsbild besitzt und bei der Weiterverarbeitung durch Extrudieren, Kalandrieren oder Spritzgießen zur thermischen Zersetzung neigt, muss es durch Zugabe von Verarbeitungshilfsmitteln und Modifiern aufbereitet werden. Diese Additive sind z.B. UV- und Thermostabilisatoren, Weichmacher, Gleitmittel, Pigmente, Füllstoffe, Schlagzähmodifizier und eventuell auch Antistatika.

SIMONA verarbeitet ausschließlich Hart-PVC (PVC-U = PVC unplasticized). Von Weich-PVC (PVC-P =

PVC-plasticized) wird dann gesprochen, wenn das Material (Mischung von PVC mit anderen Polymerisaten) mehr als 20 % Weichmacher enthält. Weich-PVC weist bei Umgebungstemperatur ein elastomerähnliches Verhalten auf und ist damit zäh und sehr flexibel. Die wichtigsten Anwendungsgebiete sind Kabelummantelungen und Folien.

In einschlägigen Normen und Richtlinien werden neben PVC-U noch weitere weichmacherfreie PVC-Typen, wie z.B. PVC-HI, genannt.

Bei den PVC-HI (High Impact) Sorten handelt es sich um erhöht- bis hochschlagzähe Typen. Sie entstehen durch Abmischen von PVC-U mit weichelastischen Stoffen (Schlagzähmodifiern) auf Basis von PAE, PE-C, EVAC, VAC etc. Es handelt sich dabei somit um einen zweiphasigen Werkstoff bestehend aus einem PVC-Homopolymer und einem Schlagzähmodifizier. Die Art und die Menge des eingesetzten Schlagzähmodifiziers hängen von den zu erreichenden Eigenschaften ab. In der Regel werden bis zu 12 % Modifizier eingesetzt. SIMONA® bietet als schlagzäh modifiziertes PVC SIMONA® PVC-MZ-COLOR in verschiedenen Farben an.

Durch sehr hohe Modifizierungsanteile muss man in der Regel einige Einschränkungen hinsichtlich der chemischen Widerstandsfähigkeit und der thermischen Beständigkeit machen.

3.5 Nachchloriertes Polyvinylchlorid (CPVC)

PVC-U kann mit speziellen Verfahren nachchloriert werden, so dass ein PVC mit einem Chloranteil größer 60 % entsteht. Es ist schwerer verarbeitbar als PVC-U, besitzt dagegen aber eine erhöhte thermische Stabilität

oberhalb von 60 °C und ist insbesondere gegenüber Chlorangriff resistenter. Technisch hat es sich in vielen Bereichen der chemischen Industrie und im Bereich Heißwasserrohre etabliert.

3.6 Polyvinylidenfluorid (PVDF)

PVDF gehört zu der Gruppe der teilfluorierten Thermoplaste.

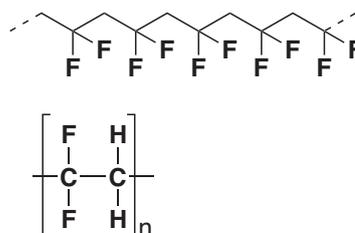


Abbildung 17: Schematische Darstellung von PVDF

Wie PVC kann das teilkristalline PVDF sowohl durch Emulsions- als auch durch Suspensionspolymerisation hergestellt werden. Die Fachliteratur bezeichnet die Emulsionspolymerisation als wichtiges Polymerisationsverfahren, das in der organischen Chemie auch als eines der bedeutendsten großtechnischen Verfahren gilt.

Fluorkunststoffe werden aufgrund ihrer hohen chemischen Widerstandsfähigkeit und thermischen Stabilität im Anlagenbau und als Druckrohrleitungen insbesondere in der chemischen Industrie eingesetzt. Ihre Eigenschaften sind vom jeweiligen Fluorgehalt abhängig. Je größer der Fluoranteil, desto höher werden z.B. die Dauergebrauchstemperatur, die Flammwidrigkeit und die chemische Widerstandsfähigkeit.

SIMONA® PVDF weist einen Fluorgehalt von etwa 57 % auf, der die hohe chemische Resistenz bis zu

Temperaturen von 120 °C gewährleistet. Die chemische Widerstandsfähigkeit ist jedoch sehr stark vom jeweiligen Medium abhängig. Schwächen zeigt PVDF lediglich im alkalischen Bereich, wenn der pH-Wert oberhalb von 10 liegt.

3.7 Ethylenchlorotrifluorethylen (ECTFE)

ECTFE gehört, genau wie das erwähnte PVDF, zu den teilfluorierten Thermoplasten. Bei diesem Werkstoff handelt es sich um ein Copolymer aus Ethylen und Chlorotrifluorethylen. Das Comonomer-Verhältnis beträgt annähernd 1:1.

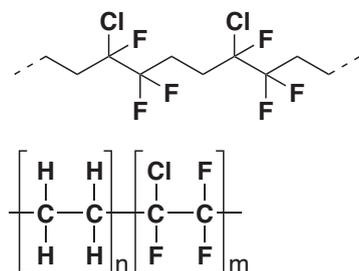


Abbildung 18: Schematische Darstellung von ECTFE

Dieser teilkristalline thermoplastische Kunststoff wird aufgrund seiner chemischen und physikalischen Eigenschaften überwiegend in der chemischen Industrie eingesetzt, wo eine hohe Korrosionsbeständigkeit gefordert ist. Anwendung findet dieser Werkstoff hauptsächlich in der Auskleidung von Stahlbehältern und in der Verbundkonstruktion in Kombination mit GFK (Glasfaserverstärkter Kunststoff). Da fluorierte Kunststoffe, ebenso wie Polyolefine, aufgrund der Oberflächenenergie nicht bzw. nur unter gewissen Umständen verklebt werden können, werden sogenannte kaschierte Materialien angeboten. Diese sind mit einem textilen Gestrick auf der Rückseite

versehen, welches eine mechanische Verankerung des Klebstoffes an der Kunststoffplatte gewährleistet. Solche textilen Gewebe sind meist aus Polyester, Polypropylen, Aramid oder Glasfaser gefertigt.

Die chemische Widerstandsfähigkeit von ECTFE liegt in der Regel zwischen der von PVDF und PTFE. Entgegen dem PVDF weist das ECTFE aber eine gute chemische Widerstandsfähigkeit im alkalischen Bereich oberhalb des pH-Wertes von 10 auf.

Weiterhin zeichnet sich ECTFE durch einen niedrigen Permeationskoeffizienten aus, der sich gerade im Verbundbau vorteilhaft auswirkt. Genauso wie PVDF ist ECTFE für den UV-A und UV-B-Bereich transparent, so dass kein chemischer Abbau durch Licht in diesem Frequenzbereich stattfindet.

Die Verarbeitung von ECTFE ist jedoch etwas kritischer als bei PVDF, da die Schweißtemperatur ein schmaleres Fenster aufweist. Dies gilt auch für das Tiefziehen, da ECTFE ab etwa 165 °C eine reduzierte Bruchdehnung besitzt.

3.8 Ethylentetrafluorethylen (ETFE)

Bei ETFE handelt es sich um ein Derivat der Kunststoffe PTFE oder ECTFE, welches man durch Copolymerisation aus den Monomeren Ethylen und Tetrafluorethylen herstellt. In seinen Eigenschaften ähnelt es dem ECTFE, wobei es dieses aufgrund des höheren Fluorgehalts in manchen Bereichen übertrifft.

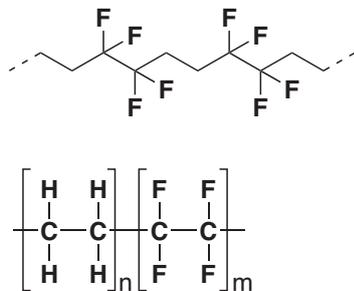


Abbildung 19: Schematische Darstellung von ETFE

3.9 Perfluoralkoxy Copolymer (PFA)

Der bekannteste vollfluorierte Thermoplast ist PTFE (Polytetrafluorethylen), das in vielen technischen Bereichen aufgrund seiner chemischen Resistenz und der hohen Temperatureinsatzgrenze bis etwa 260 °C verwendet wird. Der Nachteil dieses Materials besteht darin, dass es unter Normalbedingungen nicht geschweißt werden kann. Aus diesem Grund wurde ein PTFE-Abkömmling entwickelt, der die hohe chemische Resistenz und Einsatztemperatur mit einer guten Schweißignung vereint.

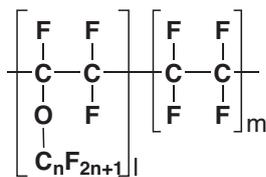


Abbildung 20: Schematische Darstellung von PFA

Das PFA besitzt genau diese Eigenschaften und kann sogar bis 260 °C eingesetzt werden. Es ist zudem gegenüber nahezu allen chemisch aggressiven Medien resistent. Der Nachteil besteht lediglich in dem hohen Preis, so dass dieser Werkstoff nur dann eingesetzt wird, wenn keine andere Alternative besteht. Ein weiterer

Vorteil dieses Werkstoffes ist die hohe Reinheit, so dass in Grenzfällen hoher Reinheitsanforderungen, z.B. in der Halbleitertechnologie, PFA als eine der wenigen Alternativen zum Einsatz kommt.

Es ist zu beachten, dass unterschiedliche PFA-Typen erhältlich sind, welche sich in ihrer Einsatzfähigkeit, wie z.B. der maximalen Einsatztemperatur, unterscheiden können. Die Differenzierung wird hierbei nach der Länge der Seitenkette getroffen (Variable n; vgl. Abbildung 20). Üblich sind Kettenlängen mit n = 1 oder n = 3. Ist n = 1 spricht man von MFA, wohingegen man bei n = 3 von PFA spricht. Chemisch gesehen sind beide PFA-Modifikationen. Mit SIMONA® PFA-M und SIMONA® PFA bietet SIMONA sowohl MFA als auch PFA an.

In Tabelle 4 sind die mechanischen Eigenschaften im Vergleich zu anderen Werkstoffen aufgeführt. Die hohe Steifigkeit zeichnet PVDF als idealen Konstruktionswerkstoff für hohe technische Ansprüche aus. Zudem besitzt dieser Werkstoff eine hohe Kerbschlagzähigkeit, die auch bis zu Temperaturen von -30 °C noch relativ hoch ausfällt, so dass die Gebrauchseigenschaften bei niedrigen Temperaturen erhalten bleiben.

	Einheit	PE-HD	PVC-CAW	PVDF	PFA
Dichte	g/cm ³	0,95	1,44	1,78	2,17
Fluorgehalt	%	0	0	57	76
Streckspannung	MPa	23	58	56	14
Dehnung bei Streckspannung	%	9	4	10	50
Kerbschlagzähigkeit	kJ/m ²	16	4	12	≤15
Einsatztemperaturobergrenze	°C	80	60	140	250

Tabelle 4: Eigenschaften unterschiedlicher Thermoplaste

3.10 Glykolmodifiziertes Polyethylterephthalat (PETG)

PETG ist ein Copolymerisat eines thermoplastischen Polyesters. Durch Verhinderung der Kristallisation ist der Werkstoff glasklar.

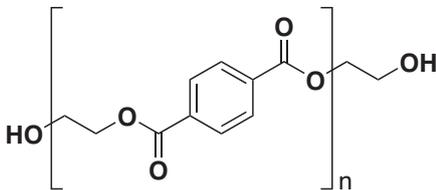


Abbildung 21: Schematische Darstellung von PETG

Das G steht für eine Glykolmodifizierung, die dem Werkstoff eine hohe Schlagzähigkeit verleiht.

PETG weist folgende Eigenschaften auf:

- transparent mit einer Lichtdurchlässigkeit von bis zu 93 %
- Temperatureinsatzbereich von -40 °C bis +65 °C
- physiologisch unbedenklich
- für Außeneinsatz bedingt geeignet
- schwer entflammbar B1 (DIN 4102)
- halogenfrei
- hohe Zähigkeit bei guter Steifigkeit
- hervorragend verformbar und tiefziehfähig
- gut verklebbar

Die SIMONA AG vertreibt diesen Werkstoff unter dem Namen SIMOLUX.

3.11 Polymilchsäure (PLA)

Poly lactide zählen ebenfalls zu den Polyestern und sind als biokompatible Kunststoffe oftmals auch aus natürlichen Ressourcen hergestellt. Aufgrund des asymmetrischen Kohlenstoffatoms im Polymerrückgrat ist PLA ein optisch aktives Polymer und kann entweder in D- oder L-Form (optische Aktivität des Moleküls) auftreten.

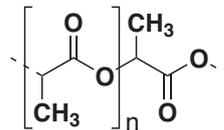


Abbildung 22: Schematische Darstellung von PLA

Poly lactide werden vor allem durch eine ionische Polymerisation von Lactid, einem cyclischen Di-Ester der Milchsäure, hergestellt. Die mechanischen Eigenschaften von reinem PLA ähneln sehr denen von Polyethylterephthalat (PET).

PLA kann aufgrund der Molekülstruktur biologisch gespalten werden und ist daher unter bestimmten Bedingungen biologisch abbaubar. Solche Bedingungen findet man in der Regel nur in industriellen Kompostieranlagen. Weiterhin ist die Abbaubarkeit stark von der chemischen Zusammensetzung abhängig.

PLA ist eines der am häufigsten genutzten Materialien für das sogenannte „Additive Manufacturing (AM)“, besser bekannt als 3D-Druck.

Die SIMONA AG vertreibt diesen Werkstoff unter den Bezeichnungen SIMOGREEN PLA und SIMOGREEN PLA-HT (Hochtemperatur). Das Material ist als Plattenware und Filament für den 3D-Druck erhältlich.

3.12 Polyamide (PA)

Polyamide, auch bekannt als Nylon, basieren auf Amidgruppen, welche untereinander sogenannte Wasserstoffbrücken ausbilden können, die unter anderem für Eigenschaften wie z.B. Festigkeit von großer Bedeutung sind. Die nachfolgende Zahlenkombination hinter den Polyamiden gibt die Größe bzw. Kettenlänge der Grundbausteine also des Diamins und der Dicarbonsäure bzw. bei nur einer Zahl die des Lactams (cyclisches Amid) an. Technisch bedeutsame Vertreter dieser Klasse teilkristalliner thermoplastischer Polymere sind z.B. PA 6.6 und PA 6.10 oder PA 6 und PA 12. Aromatische Polyamide werden auch als Polyaramide bezeichnet.

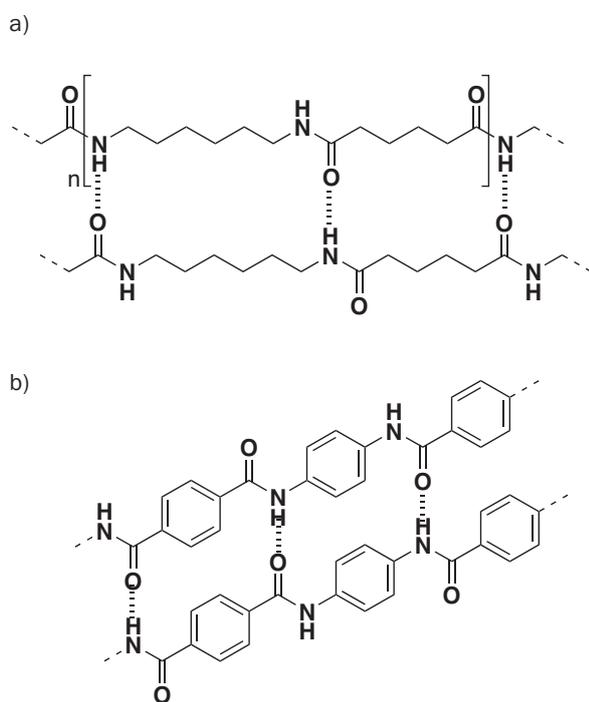


Abbildung 23: Durch Wasserstoffbrücken vernetzte Polyamide; a) Polyamid 4.6; b) Poly(p-phenylterephthalamid) (PPTA)

Viele Polyamide zeichnen sich durch eine hohe Festigkeit, Steifigkeit und Zähigkeit aus, besitzen eine gute Chemikalienbeständigkeit, einen hohen Verschleißwiderstand und gute Gleiteigenschaften sowie Verarbeitbarkeit, sind jedoch vor allem bei hohen Temperaturen hydrolyseempfindlich.

3.13 Polymethylmethacrylat (PMMA)

PMMA ist in der Regel ataktisch und amorph. Es ist glasklar und transmittiert Licht sogar besser als Mineralglas. PMMA kann eingefärbt werden und ist witterungsbeständig.

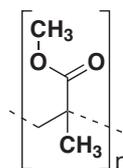


Abbildung 24: Schematische Darstellung von PMMA

Im Handel wird PMMA meist unter dem Namen Acrylglas vertrieben. Hauptanwendungsgebiete sind Scheiben oder Scheinwerferabdeckungen, Total- und Teilprothesen in der Zahnmedizin oder optische Bauteile wie Brillen- oder Uhrgläser.

3.14 Polycarbonat (PC)

Polycarbonate sind formal Polyester der Kohlensäure. Sie sind in der Regel amorph und deshalb auch transparent. Sie können jedoch eingefärbt werden und zeichnen sich durch hohe Festigkeit, Schlagzähigkeit und Härte aus. Polycarbonate finden unter anderem Verwendung als Material für Datenträger wie CDs, DVDs oder BluRays oder als Verglasung für Visiere und Gewächshäuser.

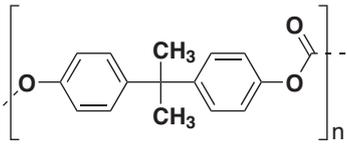


Abbildung 25: Schematische Darstellung von PC aus Phosgen und Bisphenol A

Polycarbonate finden sich im SIMONA® Produktprogramm in dem Produkt SIMONA® PC-Blend, wobei dieses Produkt aufgrund der Polymermischung nicht mehr transparent ist.

4 Werkstoffkennwerte

Alle SIMONA® Produkte zeichnen sich durch ihr hohes Qualitätsniveau aus. Die Konstanz dieses hohen Niveaus wird durch ständige Eigen- und Fremdüberwachung unserer Produkte sichergestellt.

- Überwachung von Zeitstandprüfungen an Rohren durch das Süddeutsche Kunststoffzentrum (SKZ), Würzburg und den TÜV Süd, München.
- Überwachung von Untersuchungen bei Medieneinwirkung auf thermoplastische Werkstoffe durch das Institut für Kunststoffe des TÜV Süd, München.
- Überwachung von extrudierten und gepressten Formstoffen aus Thermoplasten für den prüfzeichenpflichtigen Behälterbau durch das Institut für Kunststoffe des TÜV Süd, München.

Diese Maßnahmen sind für den prüfzeichen- bzw. abnahmepflichtigen Behälterbau von besonderer Bedeutung. Seit dem 1. Juni 2002 gilt zudem die europäische Druckgeräterichtlinie gemäß der Richtlinie EG 97/23. Zur Abnahme eines Druckgeräts müssen abhängig von der Gefahrenklasse für Halbzeuge Abnahmeprüfzeugnisse 3.1 vorgelegt werden. Die Kenndaten der Halbzeuge müssen an der Charge geprüft und entsprechend bescheinigt werden.

Im Rahmen der laufenden Kontrollen durch die werkeigene Qualitätssicherung gemäß DIN EN ISO 9001 werden alle wichtigen mechanischen, thermischen und optischen Eigenschaften überprüft und dokumentiert. Die Dokumentation der gemessenen Daten dienen der statistischen Auswertung und Selbstkontrolle. Die in den technischen Datenblättern angegebenen Kenndaten stellen Durchschnittswerte aus diesen langjährigen Untersuchungen dar. Eine Übertragbarkeit dieser Kennwerte auf andere Wanddicken oder auf Halbzeuge, die durch

andere Fertigungsverfahren hergestellt wurden, ist nur bedingt gegeben.

Die in den technischen Datenblättern aufgeführten Kennwerte sollen es dem Anwender ermöglichen, für einen bestimmten Anwendungsfall den Werkstoff mit dem günstigsten Eigenschaftsprofil zu ermitteln. Zur Dimensionierung von Bauteilen können jedoch nur einige dieser Werte herangezogen werden. Im Fall der statischen Bemessung von Rohrleitungen und Behältern sind neben den hier aufgeführten Daten noch die Langzeitkennwerte zu berücksichtigen. Diese findet der Leser in den einschlägigen Normen und der DVS 2205 sowie DVS 2210.

Die Daten sind Richtwerte des jeweiligen Werkstoffes und können in Abhängigkeit von Verarbeitungsverfahren und Probekörperherstellung variieren. Im Regelfall handelt es sich um Durchschnittswerte von Messungen an extrudierten Platten in 4 mm Dicke. Bei ausschließlich im Pressverfahren hergestellten Platten handelt es sich im Regelfall um Messungen an Platten in 20 mm Dicke. Abweichungen sind möglich, wenn Platten in diesen Dicken nicht verfügbar sind. Bei kaschierten Platten beziehen sich die technischen Kennwerte auf die unkaschierten Basisplatten. Die Angaben lassen sich nicht ohne Weiteres auf andere Produkttypen (wie z.B. Rohre, Vollstäbe) des selben Werkstoffes oder die weiterverarbeiteten Produkte übertragen. Die Eignung von Materialien für einen konkreten Verwendungszweck ist vom Verarbeiter bzw. Anwender zu prüfen. Die technischen Kennwerte sind lediglich eine Planungshilfe. Insbesondere stellen sie keine zugesicherten Eigenschaften dar. Weitere Informationen erhalten Sie in unserem Technical Service Center unter tsc@simona.de.

4.1 PE

Werkstoffkennwerte

			SIMONA® PE 100 schwarz	SIMONA® PE 100 natur	SIMONA® PE-HD schwarz	SIMONA® PE-HD natur
Dichte	g/cm ³	DIN EN ISO 1183	0,96	0,96	0,96	0,95
Streckspannung	MPa	DIN EN ISO 527	23	23	23	23
Dehnung bei Streckspannung	%	DIN EN ISO 527	9	9	9	9
Zug-E-Modul	MPa	DIN EN ISO 527	1 100	1 100	1 100	1 100
Schlagzähigkeit	kJ/m ²	DIN EN ISO 179	ohne Bruch	ohne Bruch	ohne Bruch	ohne Bruch
Kerbschlagzähigkeit	kJ/m ²	DIN EN ISO 179	25	21	16	16
Kugeldruckhärte	MPa	DIN EN ISO 2039-1	40	40	43	43
Shorehärte D (15 s)		DIN EN ISO 868	64	64	65	65
Mittlerer thermischer Längenausdehnungskoeffizient	K ⁻¹	ISO 11359-2	1,8 x 10 ⁻⁴	1,8 x 10 ⁻⁴	1,8 x 10 ⁻⁴	1,8 x 10 ⁻⁴
Wärmeleitfähigkeit	W/m · K	DIN 52612	0,38	0,38	0,38	0,38
Brandverhalten		DIN 4102	B2 [Ⓣ]	B2 [Ⓣ]	B2 [Ⓣ]	B2 [Ⓣ]
Durchschlagfestigkeit	kV/mm	DIN IEC 60243-1	47	47	–	–
Spezif. Oberflächenwiderstand	Ohm	DIN IEC 60093	≥ 10 ¹⁴	≥ 10 ¹⁴	≥ 10 ¹⁴	≥ 10 ¹⁴
Temperatur-einsatzbereich	°C		-50 bis +80	-50 bis +80	-50 bis +80	-50 bis +80
Chem. Widerstandsfähigkeit			sehr gut im Kontakt mit vielen Säuren, Laugen und Lösungsmitteln			
Physiologisch unbedenklich		BfR	✓	✓	✓	✓
Lebensmittelkonformität		EU	✓	✓	✓	✓
		FDA	–	✓	–	✓

[Ⓣ] Eigeneinschätzung ohne Prüfzeugnis

Werkstoffkennwerte

			SIMONA® PE-EL	SIMONA® PE 500	SIMONA® PE 1000
Dichte	g/cm ³	DIN EN ISO 1183	0,99	0,95	0,93
Streckspannung	MPa	DIN EN ISO 527	26	28	19
Dehnung bei Streckspannung	%	DIN EN ISO 527	7	8	11
Zug-E-Modul	MPa	DIN EN ISO 527	1 300	1 100	700
Schlagzähigkeit	kJ/m ²	DIN EN ISO 179	ohne Bruch	ohne Bruch	ohne Bruch
Kerbschlagzähigkeit	kJ/m ²	DIN EN ISO 179	6	–	–
		DIN EN ISO 11542-2	–	18	180
Kugeldruckhärte	MPa	DIN EN ISO 2039-1	50	–	30
Shorehärte D (15 s)		DIN EN ISO 868	67	65	60
Mittlerer thermischer Längenausdehnungskoeffizient	K ⁻¹	ISO 11359-2	1,8 x 10 ⁻⁴	1,8 x 10 ⁻⁴	1,8 x 10 ⁻⁴
Vicat B	°C	DIN EN ISO 306	–	80	82
Brandverhalten		DIN 4102	B2 ^⓪	B2 ^⓪	B2 ^⓪
Durchschlagfestigkeit	kV/mm	DIN IEC 60243-1	–	44	44
Spezif. Oberflächenwiderstand	Ohm	DIN IEC 60093	≤ 10 ⁶	≥ 10 ¹⁴	≥ 10 ¹⁴
Temperatur-einsatzbereich	°C		–20 bis +80	–100 bis +80	–260 bis +80
Chem. Widerstandsfähigkeit			sehr gut im Kontakt mit vielen Säuren, Laugen und Lösungsmitteln		
Physiologisch unbedenklich		BfR	–	✓	✓
Lebensmittelkonformität		EU	–	✓	✓
		FDA	–	✓	✓

^⓪ Eigeneinschätzung ohne Prüfzeugnis

4.2 PP

Werkstoffkennwerte

			SIMONA® PP-H AlphaPlus®	SIMONA® PP-H natur	SIMONA® PP-C	SIMONA® PP-EL-S	SIMONA® PPs
Dichte	g/cm ³	DIN EN ISO 1183	0,91	0,90	0,91	1,17	0,95
Streckspannung	MPa	DIN EN ISO 527	33	32	26	25	32
Dehnung bei Streckspannung	%	DIN EN ISO 527	8	8	7	7	8
Zug-E-Modul	MPa	DIN EN ISO 527	1 700	1 400	1 200	1 400	1 600
Schlagzähigkeit	kJ/m ²	DIN EN ISO 179	ohne Bruch	ohne Bruch	ohne Bruch	ohne Bruch	ohne Bruch
Kerbschlagzähigkeit	kJ/m ²	DIN EN ISO 179	9	7	45	5	6
Kugeldruckhärte	MPa	DIN EN ISO 2039-1	–	–	50	66	70
Shorehärte D (15 s)		DIN EN ISO 868	72	70	67	70	72
Mittlerer thermischer Längenausdehnungskoeffizient	K ⁻¹	ISO 11359-2	1,6 x 10 ⁻⁴	1,6 x 10 ⁻⁴	1,6 x 10 ⁻⁴	1,6 x 10 ⁻⁴	1,6 x 10 ⁻⁴
Wärmeleitfähigkeit	W/m · K	DIN 52612	0,22	0,22	0,22	–	0,22
Brandverhalten		DIN 4102	B2 ^①	B2 ^①	B2 ^①	B2 ^①	B1: 2 – 20 mm ^②
		UL 94	–	–	–	V0: ≥ 4 mm ^②	–
Durchschlagfestigkeit	kV/mm	DIN IEC 60243-1	–	–	52	–	22
Spezif. Oberflächenwiderstand	Ohm	DIN IEC 60093	10 ¹⁴	10 ¹⁴	10 ¹⁴	≤ 10 ⁶	10 ¹⁴
Temperatur-einsatzbereich	°C		0 bis +100	0 bis +100	–20 bis +80	0 bis +80	0 bis +100
Chem. Widerstandsfähigkeit			sehr gut im Kontakt mit vielen Säuren, Laugen und Lösungsmitteln				
Physiologisch unbedenklich		BfR	✓	✓	✓	–	–
Lebensmittel-konformität		EU	✓	✓	–	–	–
		FDA	✓	✓	✓	–	–

① Eigeneinschätzung ohne Prüfzeugnis

② Prüfzeugnis verfügbar

4.3 PVC hart

Werkstoffkennwerte

			SIMONA® PVC-CAW	SIMONA® PVC-MZ-COLOR	SIMONA® PVC-GLAS	SIMONA® CPVC CORZAN Industrial Grade	SIMONA® PVC-KYRNIT®
Dichte	g/cm ³	DIN EN ISO 1183	1,44	1,42	1,37	1,52	1,39
Streckspannung	MPa	DIN EN ISO 527	58	55	73	51	63
Dehnung bei Streckspannung	%	DIN EN ISO 527	4	4	4	5	4
Zug-E-Modul	MPa	DIN EN ISO 527	3 300	3 100	3 300	2 500	3 100
Schlagzähigkeit	kJ/m ²	DIN EN ISO 179	–	–	–	ohne Bruch	ohne Bruch
Kerbschlagzähigkeit	kJ/m ²	DIN EN ISO 179	4	8	3	8	4
Shorehärte D (15 s)		DIN EN ISO 868	82	82	84	80	81
Mittlerer thermischer Längenausdehnungskoeffizient	K ⁻¹	ISO 11359-2	0,8 x 10 ⁻⁴	0,8 x 10 ⁻⁴	0,8 x 10 ⁻⁴	0,7 x 10 ⁻⁴	0,7 x 10 ⁻⁴
Vicat B	°C	DIN EN ISO 306	74	74	66	112	75
Brandverhalten		DIN 4102	B1: 1 - 4 mm ^①	B1: 1 - 4 mm ^①	B1: 1 - 4 mm ^②	B1 ^①	B1 ^①
		UL 94	V0: ≥ 1 mm ^②	–	V0: ≥ 1 mm ^②	–	–
		NF P 92-501	M1: 1 - 3 mm ^②	–	M1: 1 - 3 mm ^②	–	–
		BS 476	Class 1: 3 mm ^②	–	Class 1: 3 mm ^②	–	–
Durchschlagfestigkeit	kV/mm	DIN IEC 60243-1	39	34	30	–	–
Spezif. Oberflächenwiderstand	Ohm	DIN IEC 60093	10 ¹³	10 ¹⁴	10 ¹⁴	10 ¹⁵	10 ¹³
Temperatur-einsatzbereich	°C		0 bis +60	-20 bis +60	0 bis +60	-40 bis +95	0 bis +60
Chem. Widerstandsfähigkeit			sehr gut im Kontakt mit vielen Säuren und Laugen				
Physiologisch unbedenklich		BfR	–	–	–	–	–

① Eigeneinschätzung ohne Prüfzeugnis

② Prüfzeugnis verfügbar

4.4 PVC geschäumt

Werkstoffkennwerte

			SIMOPOR-LIGHT	SIMOPOR-LIGHT BRILLIANT	SIMOPOR- ULTRALIGHT	SIMOPOR- COLOR	SIMONA® COPLAST-AS
Dichte	g/cm ³	DIN EN ISO 1183	0,55	0,50	0,47	0,58	0,67
Streckspannung	MPa	DIN EN ISO 527	16	15	15	16	18
Dehnung bei Streckspannung	%	DIN EN ISO 527	3	3	3	3	3
Zug-E-Modul	MPa	DIN EN ISO 527	900	850	600	1 000	1 100
Biege-E-Modul	MPa	DIN EN ISO 178	1 100	1 000	930	1 400	1 400
Schlagzähigkeit	kJ/m ²	DIN EN ISO 179	12	12	12	12	19
Shorehärte D (15 s)		DIN EN ISO 868	35	32	30	35	70
Mittlerer thermischer Längenausdehnungskoeffizient	K ⁻¹	ISO 11359-2	0,7 x 10 ⁻⁴	0,7 x 10 ⁻⁴	0,7 x 10 ⁻⁴	0,7 x 10 ⁻⁴	0,83 x 10 ⁻⁴
Brandverhalten		DIN 4102	B1: 1 - 19 mm ^②	—	B2 ^①	B2 ^①	B2 ^① B1: 10 mm ^③
		NF P 92-501	M1: 3 - 10 mm ^②	M1: 2 - 10 mm ^②	—	—	M1: 10 mm ^③
		DIN EN 13501-1	—	Euroclass C-s3-d0: 2 - 10 mm ^④	—	—	—
Spezif. Oberflächenwiderstand	Ohm	DIN IEC 60093	> 10 ¹⁵	> 10 ¹⁵	> 10 ¹⁵	> 10 ¹⁵	≤ 10 ¹²
Temperatureinsatzbereich	°C		0 bis +60	0 bis +60	0 bis +60	0 bis +60	0 bis +60
Chem. Widerstandsfähigkeit			sehr gut im Kontakt mit vielen Säuren, Reinigungsmitteln und Alkoholen				
Physiologisch unbedenklich		BfR	—	—	—	—	—

① Eigeneinschätzung ohne Prüfzeugnis

② Prüfzeugnis verfügbar

③ auf Anfrage

④ Prüfzeugnis ab Ende 2016

4.5 PETG, PVDF, ECTFE, PFA

Werkstoffkennwerte

			SIMOLUX (PETG)	SIMONA® PVDF	SIMONA® ECTFE	SIMONA® PFA
Dichte	g/cm ³	DIN EN ISO 1183	1,27	1,78	1,68	2,15
Streckspannung	MPa	DIN EN ISO 527	52	55	31	15
Dehnung bei Streckspannung	%	DIN EN ISO 527	4,5	8	4	–
Zug-E-Modul	MPa	DIN EN ISO 527	1 900	1 950	1 650	450
Kerbschlagzähigkeit	kJ/m ²	DIN EN ISO 179	10	12	≥ 100	ohne Bruch
Kugeldruckhärte	MPa	DIN EN ISO 2039-1	97	120	56	–
Shorehärte D (15 s)		DIN EN ISO 868	78	78	67	55
Mittlerer thermischer Längenausdehnungskoeffizient	K ⁻¹	ISO 11359-2	–	1,3 x 10 ⁻⁴	1,0 x 10 ⁻⁴	1,4 x 10 ⁻⁴
Brandverhalten		DIN 4102	B1: 1 – 8 mm [Ⓜ]	B1 [Ⓜ]	B1 [Ⓜ]	B1 [Ⓜ]
Durchschlagfestigkeit	kV/mm	DIN IEC 60243-1	16	25	23	33
Spezif. Oberflächenwiderstand	Ohm	DIN IEC 60093	10 ¹⁴	10 ¹⁴	10 ¹⁴	10 ¹⁵
Temperatur-einsatzbereich	°C		-40 bis +65	-30 bis +140	-40 bis +150	-190 bis +260
Chem. Widerstandsfähigkeit			auf Anfrage	sehr gut gegenüber fast allen Chemikalien	extrem gut auch im alkalischen Bereich	extrem gut, wird nur von wenigen Substanzen chemisch angegriffen
Physiologisch unbedenklich		BfR	✓	✓	–	–
Lebensmittelkonformität		EU	✓	✓	–	–
		FDA	✓	✓	–	✓

[Ⓜ] Eigeneinschätzung ohne Prüfzeugnis

[Ⓜ] Prüfzeugnis verfügbar

5 Physikalische Eigenschaften

5.1 Mechanische Eigenschaften

In der Mechanik unterscheidet man grob zwischen elastischen und plastischen Verformungen der Werkstoffe. Existiert zwischen der Spannung, die auf einen Körper wirkt, und der daraus resultierenden Dehnung ein linearer Zusammenhang, so erfüllt dieser Werkstoff das Hookesche Gesetz und er verhält sich linearelastisch:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

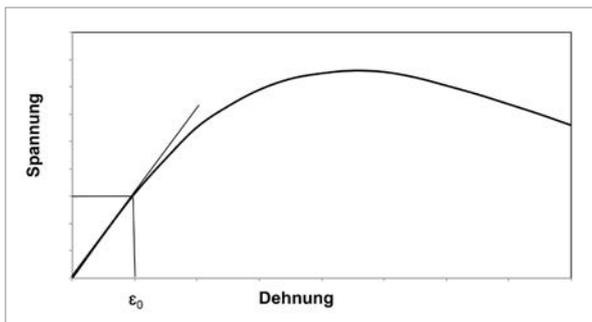


Abbildung 26: Spannungs-Dehnungs-Diagramm

Dabei stehen σ für die am Werkstück wirkende Spannung (Kraft pro Fläche), ε für die Dehnung (relative Längenzunahme bezogen auf die Ausgangslänge $\Delta L/L_0$) und E für den Elastizitätsmodul, der auch als Steifigkeit bezeichnet wird. Metallische und keramische Werkstoffe verhalten sich im Bereich kleiner Dehnungen (0,2 % Dehngrenze) linearelastisch.

Aus dem unidirektionalen Zugversuch kann man durch Auftragung der gemessenen Spannung gegen die Dehnung aus der Steigung der Kurve den E-Modul bestimmen. Die innerhalb der Hookeschen Gerade erzeugte Dehnung ist reversibel und bildet sich mit der Abnahme der äußeren Belastung wieder auf den Ursprungszustand zurück. Ein ähnlicher Zusammenhang besteht bei der Scherbeanspruchung zwischen der Schubspannung τ und der durch sie hervorgerufenen Winkeländerung γ , wobei G als Schubmodul bezeichnet wird:

$$\tau = \gamma \cdot G$$

Betrachtet man elastisch isotrope Werkstoffe, so existieren der Schub- und der Elastizitätsmodul nicht unabhängig voneinander, sondern sind über folgende Beziehung miteinander verknüpft:

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)}$$

Hierbei steht ν für die Querkontraktionszahl oder auch Poissonzahl. Die Poissonzahl ist der Betrag des Quotienten aus der Querkontraktion $\Delta D/D_0$ (D_0 = Probendurchmesser, ΔD = Änderung des Durchmessers) und der Dehnung $\Delta L/L_0$ und ist in der Regel kleiner als 0,5. Dies bedeutet, dass bei einer Belastung des Werkstoffes eine mehr oder weniger große Volumenzunahme zu verzeichnen ist.

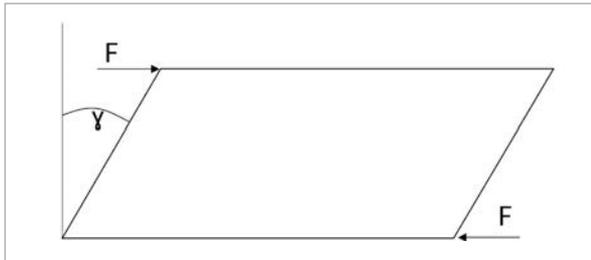


Abbildung 27: Funktionsprinzip des Scherversuchs

Feste Kunststoffe können sich dagegen im Bereich kleiner Dehnungen elastisch und viskoelastisch verhalten. Die Elastizität der Kunststoffe unterteilt man noch in die Energie- und Entropieelastizität. Die Energieelastizität wird durch die Rückstellkräfte der unter äußerer Belastung aus der Gleichgewichtslage bewegten Atome hervorgerufen. Die Entropieelastizität wird durch die im System geänderte Entropie bewirkt, die auf die Änderung des Ordnungszustands zurückgeht. Bei der idealen Gummielastizität handelt es sich beispielsweise um eine reine Form der Entropieelastizität. In realen Kunststoffen tritt in der Regel eine Mischung beider Elastizitätsformen auf, wobei häufig der energieelastische Anteil überwiegt.

Unter Viskoelastizität versteht man die zeitabhängige Elastizität eines Werkstoffes. Dies bedeutet, dass ein Kunststoff bei einer spontanen mechanischen Belastung verzögert reagiert. Als Konsequenz daraus ergibt sich, dass die mechanischen Größen eines viskoelastischen Werkstoffes keine Konstanten mehr darstellen, sondern zeitabhängig werden. Die Ursache dieses Verhaltens ist mit den Rückstellvorgängen in und zwischen den Kettenmolekülen zu erklären. Sie laufen diffusionsgesteuert ab und sind somit zeitabhängig. Das Abklingen der Reaktion eines viskoelastischen Körpers erfolgt asymptotisch, so dass sie in der Realität nie vollständig abgeschlossen ist und die Deformation in jedem Augenblick eine Funktion

der Vorgeschichte ist. Für die Berechnung des linearviskoelastischen Zustandes geht man davon aus, dass der Kunststoff aus in Reihe und parallel geschalteten Federn und Dämpfern aufgebaut ist.

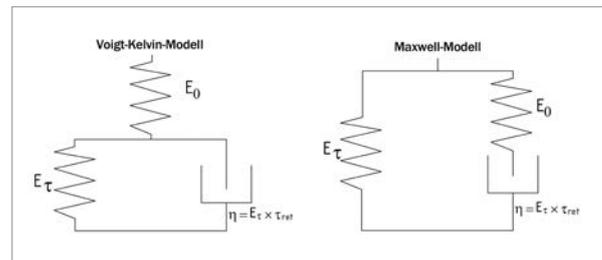


Abbildung 28: Mechanische Modelle des viskoelastischen Körpers

Die Spannungsrelaxation erhält man, indem der Werkstoff auf einen konstanten Wert gedehnt wird und das Abklingen der Spannung $\sigma(t)$ beobachtet wird (Abbildung 29). Sie ist eine Funktion des zeitunabhängigen und zeitabhängigen Moduls E_0 und E_1 :

$$\sigma(t) = \epsilon_0 \cdot E_0 + \epsilon_0 \cdot E_1 \cdot \exp(-t/\tau_{rel})$$

Die Relaxationszeit τ_{rel} ist die Zeit, nach der die Reaktion auf ein e-tel ($e \approx 2,7183$) des Anfangswertes abgeklungen ist. Nach dem Maxwell-Modell (Abbildung 28) kann man sich vorstellen, dass bei einer plötzlichen Dehnung eine Spannung durch die Federkräfte aufgebaut wird und anschließend durch die Dehnung des Dämpfungsgliedes relaxiert.

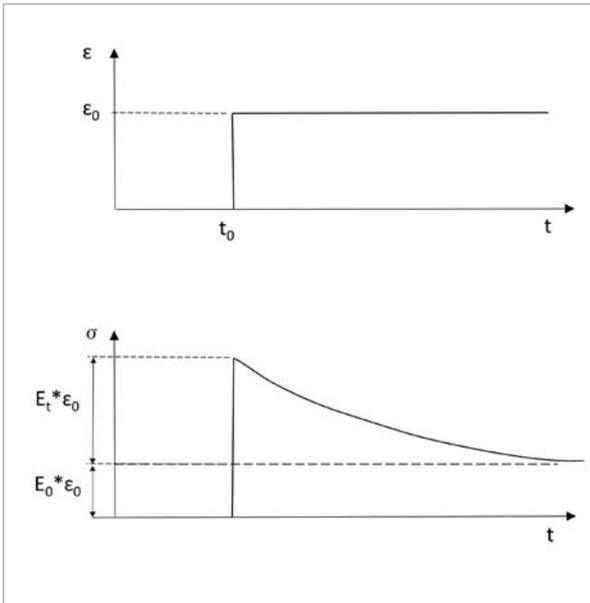


Abbildung 29: Spannungsrelaxation

Beim Kriechen wird der Körper innerhalb einer definierten Zeit t_1 mit einer Spannung σ_0 belastet und die Rückstellung (Retardation) $\varepsilon(t)$ beobachtet (Abbildung 30):

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 + \varepsilon_t \cdot \exp(-t/\tau_{\text{ret}})$$

Dabei ist τ_{ret} die Zeit bis zu der die Reaktion auf die Beanspruchung bis auf ein e-tel des Anfangswerts abgeklungen ist und ε_t die von den Retardationsvorgängen abhängige Dehnung.

Nach dem Voigt-Kelvin-Modell kann man sich im Fall des Kriechens vorstellen, dass sich nach Aufprägen einer konstanten Spannung die Federelemente gemäß ihrer Federkonstanten dehnen. Anschließend wird das Dämpfungsglied gedehnt und die Gesamtdehnung nimmt zu. Nach der Entspannung relaxieren zunächst die Federelemente (σ_0/E_0) und im Anschluss daran geht das Dämpfungselement in seine Ruhelage zurück. Bei

konstanter Dehnrage ($\varepsilon = \text{const.}$) ist die Steigung der Spannungs-Dehnungskurve in der Form von der Zeit abhängig, dass mit abnehmender Dehngeschwindigkeit die Kurve stärker nach unten gekrümmt ist, da den Relaxationsvorgängen mehr Zeit zum Abbau der Spannungen zur Verfügung steht:

$$\sigma(t) = E_0 \cdot \varepsilon + E_t \cdot \varepsilon_0 \cdot [1 - \exp(-\tau_{\text{rel}} \cdot t)]$$

Differenziert man obige Beziehung, so erkennt man, dass die Steigung $d\sigma/d\varepsilon$ nur von der Zeit t und nicht von der Dehngeschwindigkeit ε abhängt, wenn die Steigung jeweils zum gleichen Zeitpunkt bestimmt wird:

$$\frac{d\sigma}{d\varepsilon} = E_0 + E_t \cdot \exp\left(\frac{-t}{\tau_{\text{rel}}}\right)$$

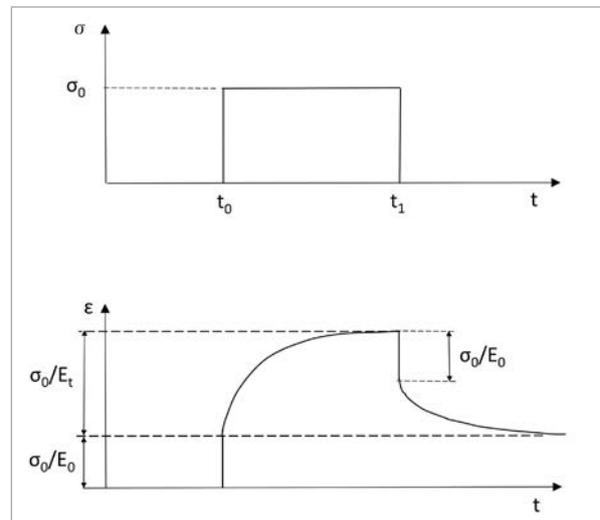


Abbildung 30: Kriechen und Kriecherholung

In der Realität verhalten sich Kunststoffe wesentlich komplizierter, so dass zur Beschreibung des viskoelastischen Verhaltens sogenannte Retardations- und Relaxationsspektren aufgenommen werden müssen.

Dies begründet sich daraus, dass die Rückstellvorgänge durch komplexe Wechselwirkungen aufgrund der unterschiedlichen Bindungsverhältnisse innerhalb des Kunststoffes hervorgerufen werden. Da die Relaxationszeiten der Kunststoffe auf molekulare Bewegungen zurückzuführen sind, hängen sie von der Temperatur ab und genügen wie die meisten thermisch aktivierten Prozesse der Arrhenius-Gleichung:

$$\tau = B \cdot \exp\left(\frac{W}{k \cdot T}\right)$$

In obiger Gleichung bedeuten B eine materialspezifische Konstante, W die Aktivierungsenergie, k die Boltzmann-Konstante und T die absolute Temperatur. Somit ist es möglich, durch die Wahl der Temperatur oder der Zeit gleiche mechanische Verhältnisse zu schaffen, oder, anders ausgedrückt, durch die Prozessführung bei erhöhter Temperatur eine Zeitraffung vorzunehmen. Aus obiger Beschreibung ist ersichtlich, dass bei der kurzzeitigen Prüfung, wenn also die Prüfzeit wesentlich geringer ist als die Reaktionszeit, oder bei der Tieftemperaturprüfung, wenn die Molekülbewegungen eingefroren sind, keine Viskoelastizität auftritt. In diesem Fall verhält sich der Werkstoff linearelastisch.

Analog zur Zug- oder Biegebelastung folgt die Reaktion eines viskoelastischen Körpers bei einer dynamischen Belastung ebenfalls verzögert. Daher tritt eine Phasenverschiebung zwischen der aufgeprägten Spannung und der Dehnung auf. In komplexer Schreibweise lauten die Gleichungen für die sinusförmige Spannung $\sigma(t)$ und Dehnung $\varepsilon(t)$:

$$\begin{aligned}\sigma(t) &= \sigma_0 \cdot \exp(i\omega t) \text{ und} \\ \varepsilon(t) &= \varepsilon_0 \cdot \exp(i\omega t + \delta)\end{aligned}$$

Die Phasenverschiebung δ ist bei ideal elastischen Körpern 0° und beträgt bei ideal viskosen Flüssigkeiten 90° . Der komplexe Ansatz ergibt einen E-Modul, der ebenfalls in der komplexen Zahlenebene dargestellt wird:

$$\frac{d\sigma}{d\varepsilon} = E = E' + iE''$$

E' kennzeichnet die bei jeder Schwingung elastisch gespeicherte Energie und wird daher als Speichermodul bezeichnet:

$$E' = E_0 + E_t \cdot \frac{\omega^2 \cdot \tau_{rel}^2}{1 - \omega^2 \cdot \tau_{rel}^2}$$

E'' kann in eine Energie umgerechnet werden, die der irreversibel dissipierten Energie entspricht und wird daher als Verlustmodul definiert:

$$E'' = E_t \cdot \frac{\omega^2 \cdot \tau_{rel}^2}{1 - \omega^2 \cdot \tau_{rel}^2}$$

Der Quotient aus E'' und E' ist gleich dem Tangens δ und ergibt den Verlustfaktor d :

$$d = \tan \delta$$

Die Konsequenz dieses Schwingungsverhaltens linear-viskoelastischer Werkstoffe ist die Tatsache, dass sich ein solches Material zwar mechanisch reversibel, jedoch thermodynamisch irreversibel verhält und somit Energie verbraucht. Kunststoffe besitzen somit ein hohes Dämpfungspotential, das in der Technik als Schallschutz genutzt werden kann.

5.1.1 Mechanische Eigenschaften der Thermoplaste

Thermoplaste bestehen aus längeren, wenig verzweigten Polymerketten, die chemisch nicht miteinander verbunden sind. Die einzelnen Kettenmoleküle sind physikalisch über die sogenannten Van-der-Waals-Kräfte miteinander verbunden, so dass ihre Bindungen reversibel sind. Daher fließen sie auch bei höheren Temperaturen und können miteinander verschweißt werden.

Thermoplaste können in amorpher und teilkristalliner Form vorliegen. Die Kristallinität entsteht in unterschiedlich stark ausgeprägten Bereichen, in denen sich die Kettenmoleküle parallel zueinander anordnen. Amorphe und teilkristalline Thermoplaste kann man anhand ihrer unterschiedlichen elastischen Eigenschaften in Abhängigkeit von der Temperatur erkennen.

Amorphe Thermoplaste besitzen bei Temperaturen oberhalb der Glasübergangstemperatur T_G nur noch eine geringe Festigkeit und einen niedrigen E-Modul, der mit der Temperatur rasch sinkt. Im Bereich des Glasübergangs erweichen die amorphen Thermoplaste.

Die Glasübergangstemperatur ist als diejenige Temperatur definiert, bei der das Leerstellenvolumen einfriert. Dieses Leerstellenvolumen ermöglicht eine gewisse freie Beweglichkeit der Moleküle bzw. Molekülketten. Daher wird das Leerstellenvolumen häufig als freies Volumen bezeichnet.

Das Gesamtvolumen eines Kunststoffes besteht aus dem Leerstellenvolumen V_L , dem Schwingungsvolumen V_S und dem Volumen des Moleküls V_M . Nach Erreichen des Glasübergangs ändert sich nur noch das Schwingungsvolumen V_S (Abbildung 31).

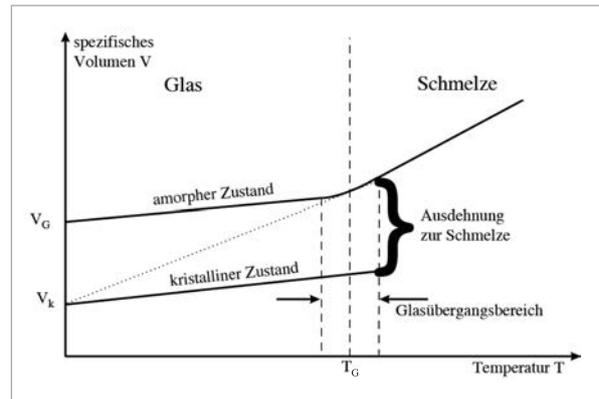


Abbildung 31: Änderung des spezifischen Volumens mit der Temperatur

Teilkristalline Thermoplaste besitzen zwischen T_G und der Kristallschmelztemperatur T_S eine geringere Temperaturabhängigkeit. Erst oberhalb von T_S sinken die mechanischen Werte stark ab und der Werkstoff beginnt zu erweichen bzw. zu schmelzen.

Teilkristalline Thermoplaste besitzen in der Regel eine hohe Reißdehnung, die bis zu 800 % betragen kann (z.B. PE). Ihr E-Modul ist relativ niedrig und kann sogar bei Raumtemperatur unter 200 MPa liegen. Zudem neigen Thermoplaste zum Kriechen, das insbesondere bei höheren Temperaturen problematisch sein kann. Weiterhin besitzen Thermoplaste aufgrund der chemisch-physikalischen Bindungsverhältnisse eine hohe Dämpfung, so dass diese Werkstoffe beispielsweise gute mechanische Dämpfungsglieder darstellen.

Thermoplaste	Zugfestigkeit MPa	E-Modul MPa	Reißdehnung %	Kerbschlagzähigkeit kJ/m ²
PVC-U	50 - 65	3.000	20 - 50	2 - 5
CPVC	75	3.500	10 - 15	2
PE-HD	20 - 30	700 - 1.200	400 - 800	6 - 15
PP-H	25 - 40	1.000 - 1.300	70 - 500	3 - 9
PVDF	50 - 60	2.400	20 - 80	22
ECTFE	32 - 40	1.700	200 - 300	-
FEP	20 - 30	350 - 500	250 - 350	-
PFA	15 - 30	600 - 700	100 - 250	-

Tabelle 5: Mechanische Eigenschaften einiger Thermoplaste

5.1.2 Der Zugversuch

Beim unidirektionalen Zugversuch nach DIN EN ISO 527 wird ein Probekörper mit je nach Herstellungsart definierten Abmessungen unter einer optional wählbaren Geschwindigkeit bis zum Bruch gedehnt.

Die maximal erreichte Spannung vor Eintritt des Fließens wird als Streckspannung σ_y bezeichnet. Die dazugehörige Dehnung wird Streckdehnung ε_y genannt. Die Zugspannung, bei der der Bruch eintritt, ist die Bruchfestigkeit σ_b und die dazu korrespondierende Dehnung die Bruchdehnung ε_b . Die Zugspannung, bei der das erste Spannungsmaximum auftritt wird als Zugfestigkeit σ_m bezeichnet. So kann die Zugfestigkeit σ_m je nach Werkstoff der Bruchfestigkeit σ_b (z.T. amorphe Thermoplaste) oder der Streckspannung σ_y (z.B. teilkristalline Thermoplaste) entsprechen.

Der Kurzzeit-Zugmodul wird aus der Steigung der Spannungs-Dehnungskurve ermittelt. Dabei werden die Spannungen zu den Dehnungen von 0,05 % und 0,25 % bestimmt und aus dem Quotienten der Differenz der Spannungen ($\Delta\sigma = \sigma_{0,25\%} - \sigma_{0,05\%}$) und der Differenz der

Dehnungen ($\Delta\varepsilon = 0,25 - 0,05 = 0,2$) der Tangenten- oder Sekantenmodul berechnet:

$$E = \frac{\sigma_{0,25} - \sigma_{0,05}}{0,2}$$

Bei der Durchführung der Prüfung ist auf eine sorgfältige Probenvorbereitung zu achten, da durch schiefe Einspannung oder auch schiefe Proben Scherkräfte wirken, die das Messergebnis meist zu kleineren Werten hin verändern. Auch Kerben oder Einbuchtungen an den Probenoberflächen beeinflussen das Messergebnis negativ. Um den Einfluss der Einspannung zu verringern, kann die Zugprobe an den Enden mit verdickten Endstücken hergestellt werden, die die Druckkräfte der Einspannvorrichtung aufnehmen. Gleiches erzielt man bei der Verwendung von Schulterstäben.

Teilkristalline Werkstoffe wie PE, PP und PVDF weisen meist eine ausgeprägte Streckgrenze und hohe Reißdehnung auf (Abbildung 32), während amorphe Thermoplaste wie PVC eine höhere Streckspannung, aber geringere Reißfestigkeit und Reißdehnung zeigen (Abbildung 33).

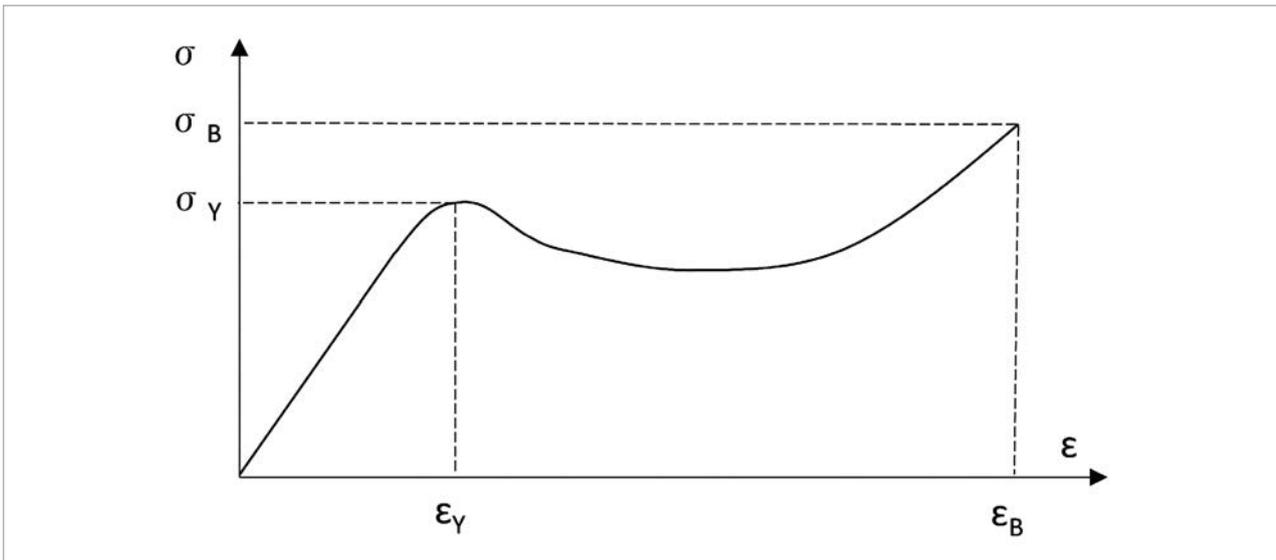


Abbildung 32: Schematische Darstellung einer Spannungs-Dehnungskurve eines teilkristallinen Thermoplasts

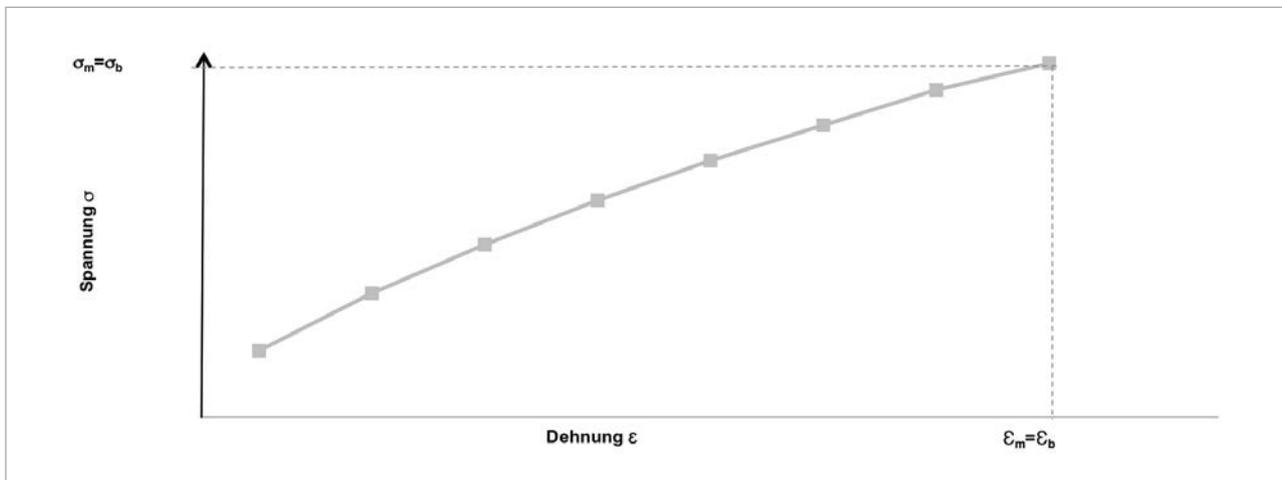


Abbildung 33: Spannungs-Dehnungskurve mit Zugfestigkeit σ_y , Reißfestigkeit σ_b und den dazugehörigen Dehnungen für amorphe Thermoplaste

In Abbildung 34 ist der Kurzzeit-E-Modul verschiedener SIMONA® Thermoplaste in Abhängigkeit von der Temperatur aufgeführt. In diesem Prinzip-Diagramm sind die hohe Steifigkeit von PVC bei Raumtemperatur sowie

der steile Abfall des E-Moduls oberhalb von 60 °C zu erkennen.

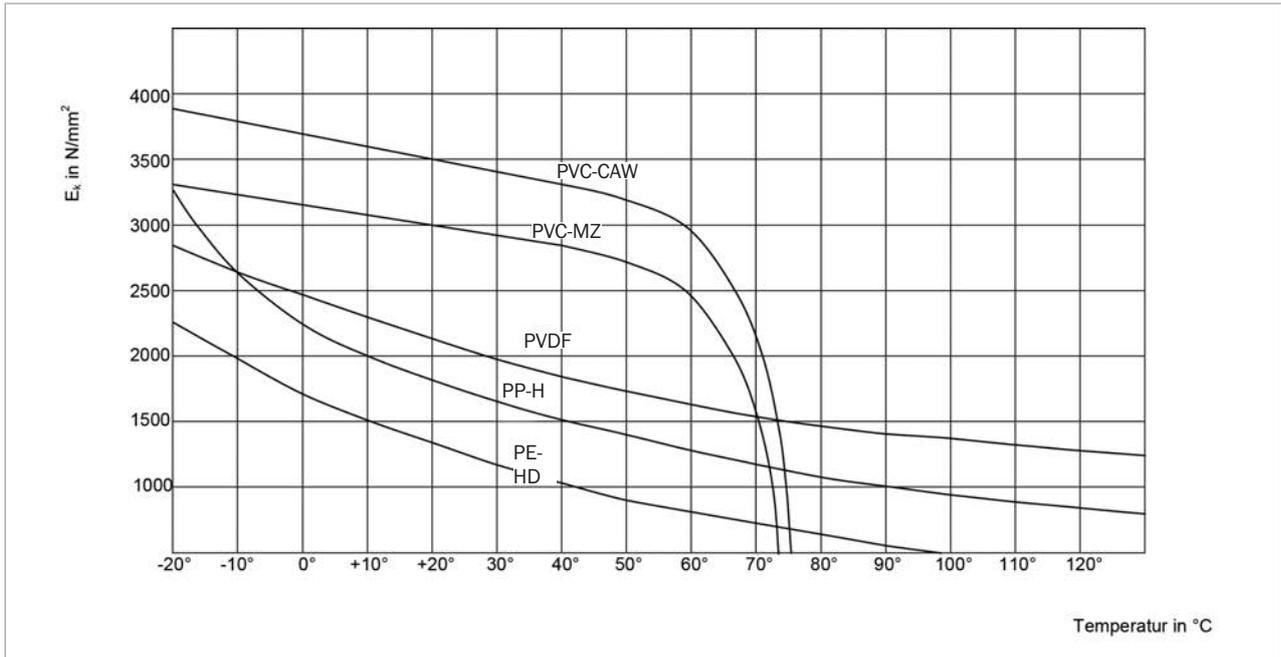


Abbildung 34: Kurzzeit-Elastizitäts-Modul von SIMONA® Thermoplasten in Abhängigkeit von der Temperatur

5.1.3 Der Biegeversuch

Der Drei- und Vierpunkt-Biegeversuch nach DIN EN ISO 178 und DIN EN ISO 14125 wird in der Technik am häufigsten angewendet, da er sich durch eine einfache Probenform und Prüfung auszeichnet. Die Beurteilung und Auswertung der Spannungs-Dehnungskurve ist jedoch etwas komplizierter.

Die Biegespannung σ_b ist der Quotient aus Biegemoment M und Biege­widerstand W:

$$\sigma_b = \frac{M}{W}$$

M ergibt sich aus der Kraft F und dem Auflagerabstand l_v :

Dreipunktbiegung:
$$M = \frac{F \cdot l_v}{4}$$

Vierpunktbiegung:
$$M = \frac{F \cdot l_A}{2}$$

Dabei beträgt $2 l_A$ die Differenz zwischen der unteren und oberen Stützweite. Das Widerstandsmoment ergibt sich aus der Breite B und Höhe H der Probe:

$$W = \frac{B \cdot H^2}{6}$$

Daraus ergibt sich die Biegespannung σ_b zu:

Dreipunktbiegung:
$$\sigma_b = \frac{3 \cdot F \cdot l_v}{2 \cdot B \cdot H^2}$$

Vierpunktbiegung:
$$\sigma_b = \frac{3 \cdot F \cdot l_A}{B \cdot H^2}$$

Vierpunktbiegung:
$$\varepsilon = \frac{4 \cdot f \cdot H}{l_B^2}$$

Der E-Modul wird folgendermaßen berechnet:

$$E = \frac{\sigma_{b_2} - \sigma_{b_1}}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}$$

Dabei errechnet sich die Randfaserdehnung aus der Durchbiegung f mit $l_B =$ obere Stützweite:

Dreipunktbiegung:
$$\varepsilon = \frac{6 \cdot f \cdot H}{l_V^2}$$

Analog zum Zugversuch ist auch beim Biegeversuch auf eine sorgfältige Probenpräparation zu achten, da auch hier Oberflächenrisse das Messergebnis stark beeinflussen.

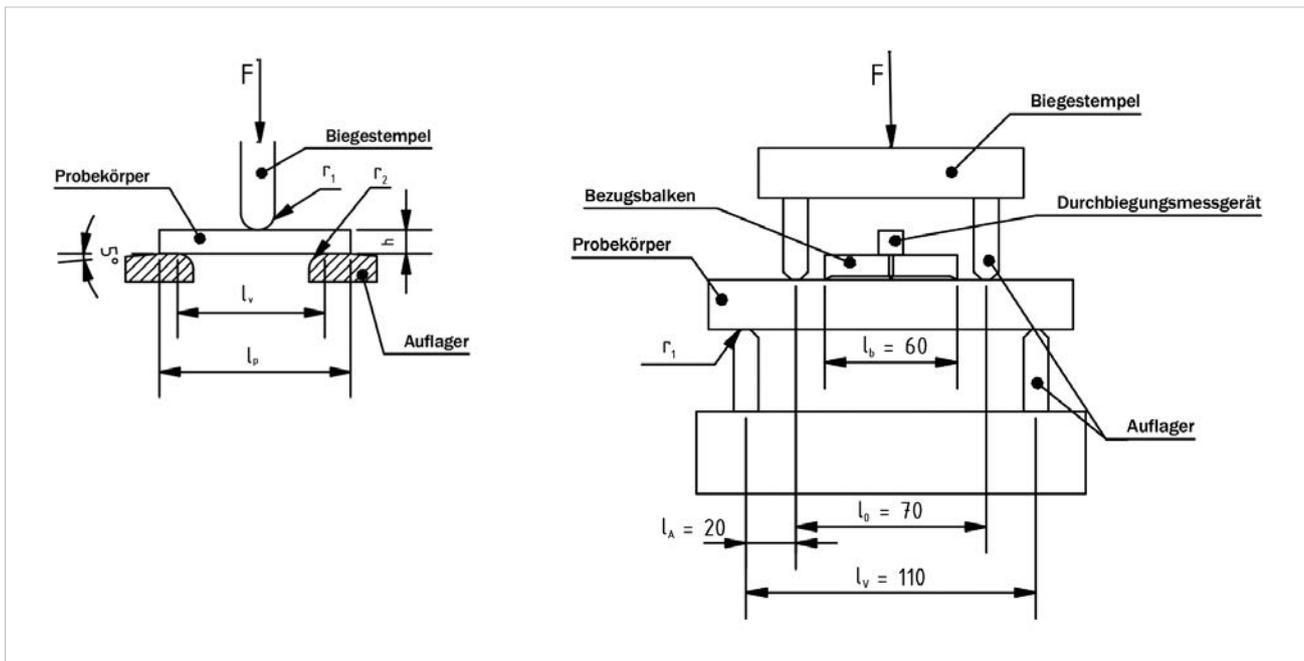


Abbildung 35: Schematischer Aufbau des Dreipunkt- und Vierpunkt-Biegeversuchs

5.1.4 Der Druckversuch

Der Druckversuch nach DIN EN ISO 604 wird in der Regel dann verwendet, wenn der in der Praxis eingesetzte Werkstoff hauptsächlich einer Druckbelastung unterliegt. Als Prüfkörper werden rechtwinklige Prismen, Zylinder oder Rohre verwendet. Um das Abplatzen der Druckflächen bei spröden Kunststoffen zu verhindern, werden sie in sogenannte Kappen gesteckt, die den Werkstoff seitlich abstützen. Zur Beurteilung von dünneren Werkstücken wie Platten werden auch Schulterstäbe verwendet.

Die Prüfung erfolgt mit konstanter Kraft- oder Dehnrates, die von der Länge der Probe abhängt. Die Berechnung der Druckfestigkeit, des E-Moduls und der Stauchung erfolgt analog zum Zugversuch.

Bei der Probenpräparation ist auf die Planparallelität der Stirnflächen zu achten, um Scherbelastungen in Kombination mit der Stauchung zu vermeiden. Gerade spröde Werkstoffe reagieren sehr empfindlich auf derartige Belastungen, so dass das Messergebnis verfälscht würde.

5.1.5 Der Torsionsschwingversuch

Mit Hilfe des Torsionspendel-Verfahrens nach DIN EN ISO 6721 können die elastischen, viskoelastischen, energie- und entropieelastischen Eigenschaften eines Werkstoffes über einen großen Temperaturbereich bestimmt werden.

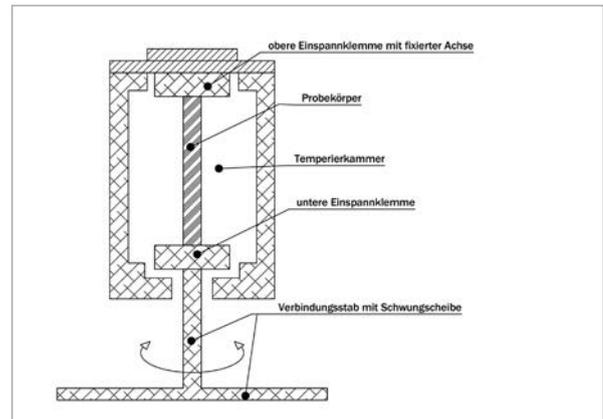


Abbildung 36: Der Torsionsschwingversuch

Die Proben können einen runden oder eckigen Querschnitt besitzen. Sie werden an beiden Enden in die Vorrichtung eingespannt, wobei ein Ende mit der Schwungscheibe verbunden ist.

Die Schwungscheibe wird zu Beginn der Messung um einen bestimmten Winkel α ausgelenkt, der klein gehalten wird, um die Probe nicht über Gebühr zu belasten. Nun lässt man das System frei schwingen und die Schwingamplitude A wird als Funktion der Zeit t aufgezeichnet. Aus der Abnahme der Amplitude mit der Zeit aufgrund der inneren Reibung (gedämpfte Schwingung) ergibt sich das logarithmische Dekrement Λ , indem der Quotient aus den Amplituden zweier aufeinanderfolgender Schwingungen A_n und A_{n+1} gebildet wird:

$$\Lambda = \frac{A_n}{A_{n+1}}$$

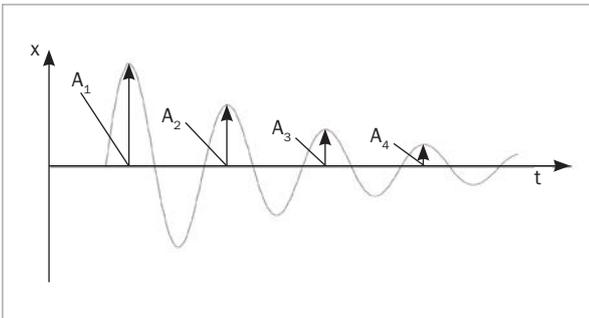


Abbildung 37: Gedämpfte Schwingung

Das logarithmische Dekrement Λ ist eng mit der Dämpfung d verknüpft:

$$d = \frac{\Lambda}{\pi \cdot \left(1 + \frac{\Lambda^2}{4 \cdot \pi^2}\right)}$$

Aus dem Trägheitsmoment I , der Probenlänge L , der Probenbreite b , der Probendicke a und der Eigenfrequenz f_0 , die sich aus dem zeitlichen Verlauf der Schwingungskurve ergibt, wird der Schubmodul G berechnet:

$$G = 4 \cdot \pi^2 \cdot I \cdot f_0^2 \cdot \left(1 + \frac{\Lambda^2}{4 \cdot \pi^2}\right) \cdot \left(\frac{3 \cdot L}{b \cdot a^3 \cdot \left(1 - 0,63 \cdot \frac{a}{b}\right)}\right)$$

mit $I = \frac{1}{2} \cdot m \cdot r^2$

Dabei ist m die Masse und r der Radius der Schwingungsscheibe.

Da der Verlustfaktor d gleich dem Tangens des Phasenwinkels δ ist, kann bei bekanntem G der Speichermodul G' und der Verlustmodul G'' berechnet werden:

$$G' = G \cdot \cos \delta$$

$$G'' = G \cdot \sin \delta$$

Der Torsionsschwingversuch eröffnet vielfältige Möglichkeiten, einen Werkstoff näher zu charakterisieren und seine Grenzen festzulegen. Es hat sich daher in der Prüftechnik die Messung der dynamischen Eigenschaften in Abhängigkeit von der Temperatur und der Anregungsfrequenz etabliert. Aus diesen Messungen entstehen Kennfelder, die den Werkstoff näher beschreiben.

Eine der einfacheren Varianten stellt die Definition der Glasübergangstemperatur T_g von Kunststoffen dar. Es werden dazu die Moduln G' und G'' bestimmt. Deren Schnittpunkt über der Abszisse bezeichnet man als Glasübergang.

5.1.6 Der Ring- und Segmentscherversuch

Um die interlaminare Haftung oder die Haftung eines Liners mit der Verstärkungsschicht eines Rohres zu messen, wird der Ringscherversuch oder der Segmentscherversuch nach der DIN 53769-1 verwendet.

Der Ringscherversuch (Abbildung 38) geht von einem 30 mm langen Rohrstück aus, bei dem ein Ende auf der Länge von 5 mm bis zur Mitte der Rohrwand oder beim Liner-GFK-Rohr bis zum Liner von außen abgedreht wird. Das andere Ende wird in gleicher Weise jedoch von innen abgedreht. Die Ringscherfestigkeit τ_R ergibt sich aus der gemessenen Versagenskraft F und der Haftfläche $2 \cdot \pi \cdot r \cdot h$:

$$\tau_R = \frac{F}{2 \cdot \pi \cdot r \cdot h}$$

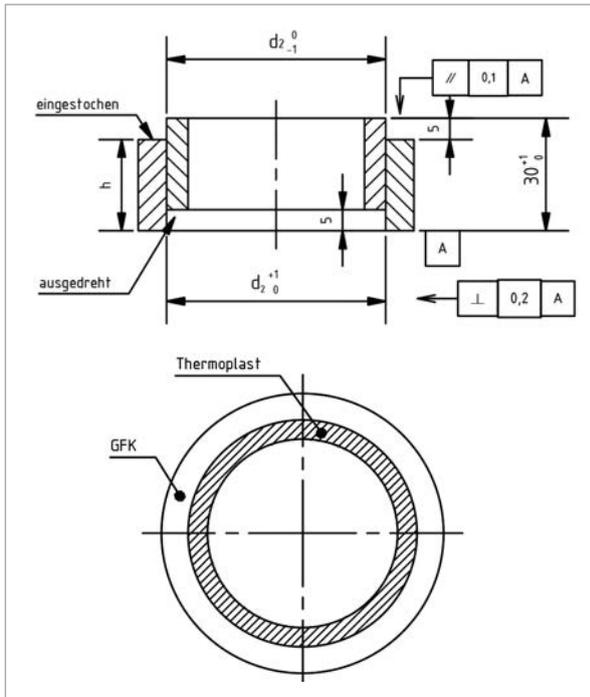


Abbildung 38: Der Ringscherversuch

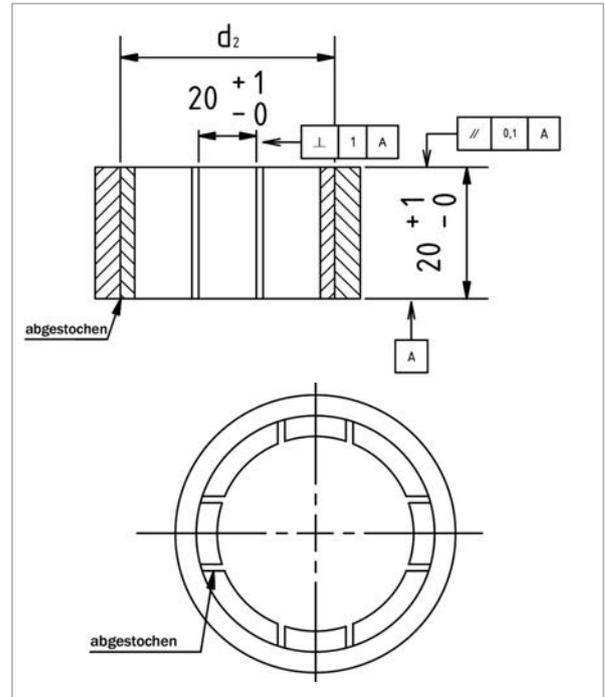


Abbildung 39: Der Segmentscherversuch

Beim Segmentscherversuch (Abbildung 39) wird lediglich ein Segment des Rohres geprüft. Dieses Segment wird erzeugt, indem ein Rohrstück mit der Länge von 20 mm längs zur Zylinderachse eingekerbt wird und somit Segmente der Breite b entstehen.

Mit Hilfe eines Stempels, dessen Breite der Segmentbreite entspricht, wird das Segment des Rohrstücks auf Druck belastet. Das Segment ist dabei auf der Unterlage so angeordnet, dass es nach unten frei abscheren kann. Die Segmentscherfestigkeit τ_s ergibt sich dann zu:

$$\tau_s = \frac{F}{b \cdot h}$$

5.1.7 Der Stirnzugversuch

Der Stirnzugversuch nach DIN 53766-1 stellt unter anderem eine Möglichkeit dar, die Haftfestigkeit zwischen dem Auskleidungswerkstoff und dem Traglaminat zu beurteilen. Demnach wird eine Versuchsprobe mit einem Durchmesser von 30 mm auf die entsprechenden Zugstempel aufgebracht oder aufgeschweißt, so dass die Zylinderachse des Versuchskörpers senkrecht zur Laminat-Ebene steht (Abbildung 40). Diese Anordnung wird dann im Zugversuch bis zum Bruch belastet. Die Haftfestigkeit σ_h ergibt sich aus der gemessenen maximalen Kraft F_{\max} pro Fläche A_0 :

$$\sigma_h = \frac{F_{\max}}{A_0}$$

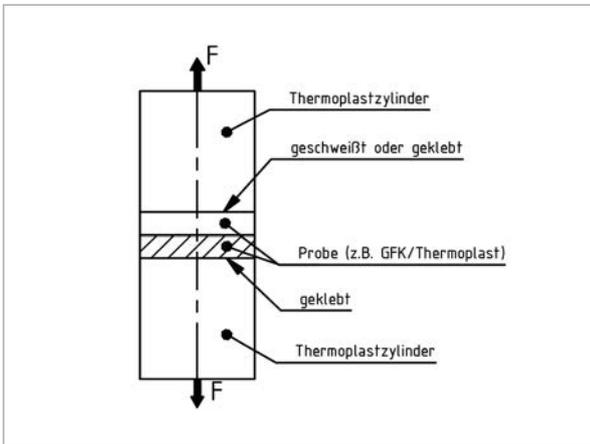


Abbildung 40: Probenanordnung zur Messung der Haftfestigkeit (Probekörper Form A)

5.1.8 Prüfung der Kerbschlagzähigkeit

Kunststoffe sind im Allgemeinen wesentlich schlag- und kerbschlagempfindlicher als andere konventionelle Werkstoffe, wie z.B. Stahl. Der Begriff „Schlagempfindlichkeit“ charakterisiert das unterschiedliche Werkstoffverhalten bei statischer (ruhender) und schlagartiger Beanspruchung. Darunter versteht man eine Kraft, die mit hoher Geschwindigkeit kurzzeitig auf einen Körper wirkt. Das Verhalten bei schlagartiger Beanspruchung kann mit unterschiedlichen Prüfverfahren untersucht werden.

Im europäischen Raum wird der Schlagbiegeversuch nach DIN EN ISO 179 angewandt und die Kerbform nach Charpy verwendet.

Mit Hilfe eines Pendelschlagwerkes nach DIN 51222 wird der Probekörper einer schlagartigen 3-Punkt-Biegebeanspruchung unterworfen (Abbildung 41).

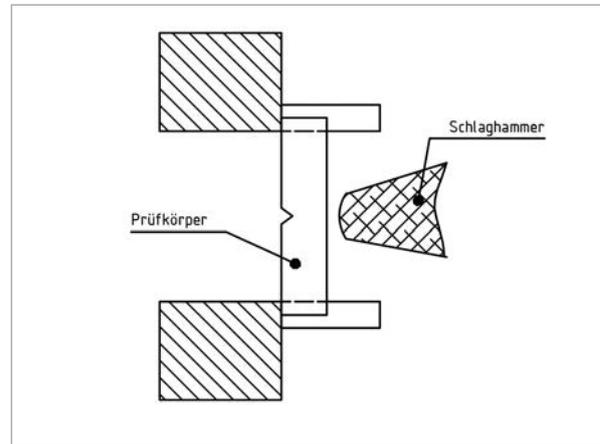


Abbildung 41: Schlagbiegeversuch nach Charpy

Gemessen wird die vom Probekörper absorbierte Schlagarbeit. Man unterscheidet zwischen den Kenndaten für Schlag- und Kerbschlagzähigkeit.

5.1.9 Prüfung der Schlagzähigkeit

Die Schlagzähigkeit wird mit Hilfe eines ungekerbten Probekörpers ermittelt. Einige SIMONA® Werkstoffe weisen bei dieser Prüfung (Raumtemperatur: 23 °C) keinen Bruch auf. Es kann also auch keine Brucharbeit angegeben werden. In der Datenübersicht in Kapitel 4 finden Sie deshalb die Angabe „ohne Bruch“. In solchen Fällen wird daher zur Differenzierung bevorzugt die zuvor beschriebene Kerbschlagzähigkeit herangezogen. Die Prüfung der Schlagzähigkeit erhält jedoch dann eine besondere Aussagefähigkeit, wenn äußere Einflüsse, wie z.B. UV-Licht oder Chemikalien, eine Versprödung bewirken.

Aufschlussreich ist vor allem die Abhängigkeit der Schlag- und Kerbschlagzähigkeit von der Temperatur. Bei sehr tiefen Temperaturen werden im Allgemeinen Sprödbrüche erzielt, bei höheren Temperaturen jedoch Verformungsbrüche. So kann anhand temperaturabhän-

giger Schlagzähigkeits- bzw. Kerbschlagzähigkeitswerte eine Aussage über die unteren Einsatztemperaturen des entsprechenden Werkstoffes gemacht werden. Das wird in besonderem Maße durch das Diagramm in Abbildung 42 verdeutlicht.

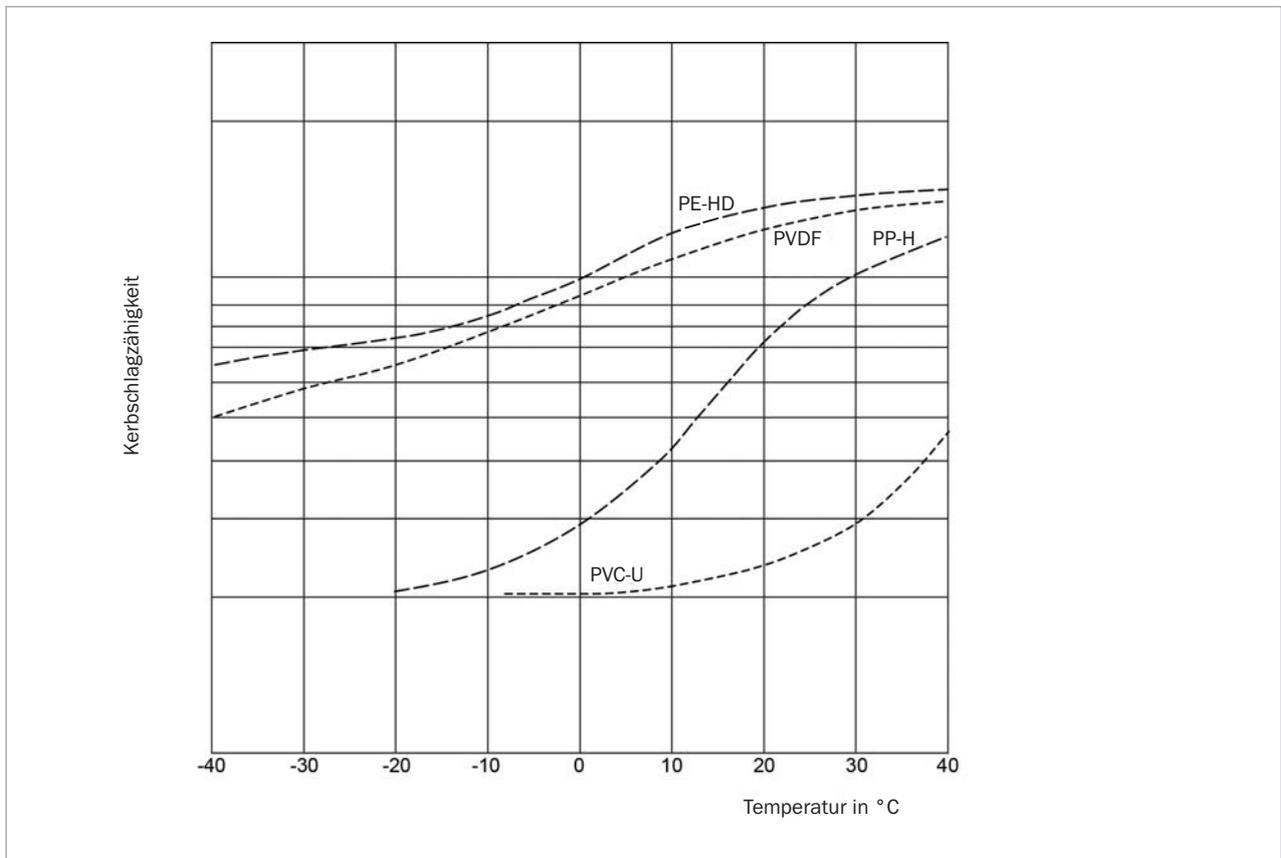


Abbildung 42: Kerbschlagzähigkeit als Funktion der Temperatur

Hohe Werte der Kerbschlagzähigkeit = hohe Zähigkeit

Niedrige Werte der Kerbschlagzähigkeit = hohe Sprödigkeit

5.1.10 Oberflächenhärte

Zur Untersuchung der Oberflächenhärte eines Werkstoffes werden üblicherweise statische Verfahren verwendet. Bei der Härtemessung wird der Widerstand einer Werkstoffoberfläche gegenüber dem Eindringen eines härteren Körpers (Stahlkugel, Stahlkegel oder Diamantkegel) gemessen oder die Werkstoffverdrängung durch den eingedrungenen Körper bestimmt. Die Härte eines Werkstoffes ist ein Maß der Steifigkeit, wobei die Härte außerhalb des elastischen Werkstoffverhaltens ermittelt wird und somit nicht mit dem E-Modul ins Verhältnis gesetzt werden kann.

5.1.10.1 Kugeldruckhärte H nach DIN EN ISO 2039-1

Eine Kugel ($d = 5 \text{ mm}$) drückt mit einer definierten Kraft für die Dauer von 30 Sekunden auf die Werkstoffoberfläche. Die Kugeldruckhärte errechnet sich aus der Prüfkraft F in N und der Oberfläche A in mm^2 des Eindrucks in der Werkstoffoberfläche:

$$H = \frac{F}{A}$$

5.1.10.2 Härte nach Shore D gemäß DIN EN ISO 868

Das Prüfverfahren nach Shore gestattet eine schnelle Bestimmung der Härte von Kunststoffen und Hartgummi. Dabei wird ein spitzer Prüfkörper mit einer definierten Spitze und Kraft für gewisse Zeit in den zu prüfenden Werkstoff hineingedrückt.

Das Messgerät setzt den Widerstand gegenüber dem Eindringen des Prüfkörpers in die entsprechenden Härtewerte um. Als Prüfkriterium können verschiedene Prüf-

zeiten angesetzt werden. Je nach Werkstoff können zwei unterschiedliche Prüfkörpertypen verwendet werden: Typ A für weiche Materialien und Typ D für härtere.

SIMONA® Materialien werden hauptsächlich nach dem Shore D Verfahren geprüft. Die Prüfdauer dabei beträgt 15 sec.

5.1.11 Verschleißeigenschaften

Als Verschleiß bezeichnet man den Abtrag von Material aus einer Oberfläche durch mechanische Beanspruchungen. Die Beschreibung des Abtrages des Materials aus einer Oberfläche ist sehr komplex und hängt zum einen mit der Impulsübertragung der auf die Oberfläche auftreffenden Teilchen und zum anderen mit den Adhäsionseigenschaften der Oberfläche zusammen. Es wird daher zunächst in Reibungverschleiß, Strahlerosion, Gleitverschleiß und Kavitationsverschleiß unterschieden. Der Verschleiß ist dabei noch davon abhängig, ob die Verschleißteilchen trocken oder in einer Flüssigkeit wirken.

So vielfältig wie die Verschleißformen, so vielfältig sind auch die Prüfmethode zur Ermittlung der Verschleißfestigkeit eines Werkstoffes. Dabei ist noch zu beachten, dass der Verschleiß zum einen vom Material und zum anderen von den Versuchsbedingungen abhängt. Somit ist zur Beurteilung des Verschleißes immer das Tribosystem, bestehend aus dem Material, dem Verschleißmittel und den Versuchsparametern, mit einzubeziehen. Gängige Prüfverfahren sind das Reibradverfahren, das Stift-Scheibe-Experiment, der Strahlverschleiß und der Sand-Slurry-Test, um nur einige zu nennen.

Beim **Reibradverfahren** rotiert eine ebene und runde Platte unter zwei mit Schmirgelleinen bespannten, freidrehbaren Rollen. In der DIN 53754 sind die Anpresskraft der Rollen mit 5,4 N und die Rotationsgeschwindigkeit des Tellers mit 55 min^{-1} definiert. Die Höhe des Verschleißes wird aus der Massen- bzw. Volumenabnahme der Platte pro Zeiteinheit bestimmt.

Das **Stift-Scheibe-Experiment** ist zur Messung des Gleitverschleißes entwickelt worden und besteht aus einer rotierenden Reibplatte, auf die die Probe in Stiftform mit definierter Kraft gedrückt wird. Wieder wird die Massen- oder Volumenabnahme als Maß des Verschleißes verwendet.

Die Ermittlung des **Strahlverschleißes** erfolgt durch die Bestrahlung einer Probeplatte mit Teilchen definierter Größe und Geschwindigkeit. Der Vorteil dieses Verfahrens besteht in seiner Variationsbreite. So kann beispielsweise zu dem Strahlgut eine Flüssigkeit gegeben werden, um die Wirkung unterschiedlicher Schmiermittel mit einzubeziehen. Zusätzlich kann der Verschleiß in Abhängigkeit vom Einstrahlwinkel gemessen werden. Nachteilig ist jedoch die Abhängigkeit des Verschleißes von der Versuchsdauer, da mit zunehmender Erosion ein Loch entsteht, dessen geometrische Eigenschaften nichts mit der ebenen Platte gemein haben.

Der **Sand-Slurry-Test** besteht aus einem Topf mit einem Sand-Wassergemisch im definierten Verhältnis, in dem die Proben mit vorgegebener Geschwindigkeit rotieren. Aufgrund des doppelwandigen Verschleißtopfes kann zudem die Temperaturabhängigkeit des Verschleißes ermittelt werden. Durch die Wahl des Verschleißmediums sind somit sehr praxisnahe Untersuchungen des Verschleißes von durchströmten Bauteilen wie Rohren durchführbar.

Gemäß einschlägiger Literatur ist der Verschleiß μ_v von den mechanischen und adhäsiven Eigenschaften eines Werkstoffes abhängig. Qualitativ hängt er von den Reibungskoeffizienten f , dem E-Modul, der Streckgrenze σ_s und der Streckdehnung ε_s ab:

$$\mu_v \sim \frac{f}{E} \cdot \frac{1}{\sigma_s \cdot \varepsilon_s}$$

Der Reibungskoeffizient f setzt sich aus einem adhäsiven Teil f_{ad} und einem deformativen Teil f_{def} additiv zusammen.

Der adhäsive Reibungskoeffizient f_{ad} ist eine Funktion der Scherfestigkeit τ_s , dem Anpressdruck p , dem Elastizitätsmodul E und der Oberflächengüte β :

$$f_{ad} = \frac{\tau_s}{p} \cdot \left[1 - \exp\left(-\beta \cdot \frac{p}{E}\right) \right]$$

Der deformative Reibungskoeffizient f_{def} ist von den mechanischen Eigenschaften des Reibguts Γ , dem Anpressdruck p , dem E-Modul und dem Verlustfaktor $\tan \delta$ der Probe abhängig:

$$f_{def} = \Gamma \cdot \frac{p}{E} \cdot \tan \delta$$

Daraus wird ersichtlich, dass der Verschleiß eines Werkstoffes in erster Näherung von $1/E^2$ abhängt:

$$\mu_v \sim \left(\frac{\tau_s \cdot \beta \cdot p}{E^2} + \frac{\Gamma \cdot p \cdot \tan \delta}{E^2} \right) \cdot \frac{1}{\sigma_s \cdot \varepsilon_s}$$

Die Verschleißfestigkeit wird somit um den Faktor 4 erhöht, wenn der E-Modul um die Hälfte sinkt. Die Streckgrenze σ_s und die Streckdehnung ϵ_s wirken dagegen nur linear auf den Verschleiß. Als Konsequenz folgt hieraus, dass aufgrund der bis zu 200-fach höheren Reißdehnung von Thermoplasten (z.B. PE) diese gegenüber Duroplasten und einigen Stählen einen niedrigeren Verschleiß aufweisen.

5.1.11.1 Der Sand-Slurry-Test

Für die Simulation des Verschleißes in Rohrleitungen durch wässrige Festkörpergemische mit turbulenten Strömungsverhältnissen eignet sich der Sand-Slurry-Test recht gut. Er stellt experimentell keine hohen Anforderungen, gestattet aber dennoch eine genügend genaue Differenzierung zwischen verschiedenen Thermoplasten.

Die Versuchsanordnung zu diesem Test (Abbildung 43) besteht aus parallel angeordneten Reihen von nebeneinanderliegenden Verschleißbehältern aus Chromnickelstahl, die mit einer Aufschlämmung aus zwei Gewichtsteilen Wasser und drei Gewichtsteilen Quarzsand der Körnung zwischen 0,5 mm und 1,5 mm gefüllt sind. In diesem Behälter rotieren quaderförmige Proben 24 Stunden lang mit konstanter Drehzahl.

Die Prozesstemperatur lässt sich zwischen 20 °C und 80 °C frei wählen. Für niedrige Messtemperaturen, z.B. 20 °C, wird die beim Rotieren der Proben an den Verschleißstöpfen entstehende Wärme durch Kühlen abgeführt. Zusätzlich ist die Apparatur mit einer Wärmeisolierung ausgestattet, um eine konstante Temperatur bis 80 °C zu gewährleisten.

Die Verschleißfestigkeit hängt u.a. in erheblichem Maße vom Molekulargewicht des polymeren Werkstoffes ab. Mit der Höhe des Molekulargewichtes steigt die Verschleißfestigkeit des Materials an. Von den SIMONA® Halbzeugen weist SIMONA® PE 1000 die höchste Verschleißfestigkeit auf.

Die Prüfapparatur des Sand-Slurry-Tests macht es möglich, den Einfluss der Temperatur auf das Verschleißverhalten zu untersuchen. Dabei wurde festgestellt, dass mit steigender Temperatur die Verschleißfestigkeit erheblich zunimmt (Abbildung 44), da Thermoplaste zwar mit der Temperatur weicher werden (sinkender E-Modul), aber die Reißdehnung und Dämpfung überproportional steigen.

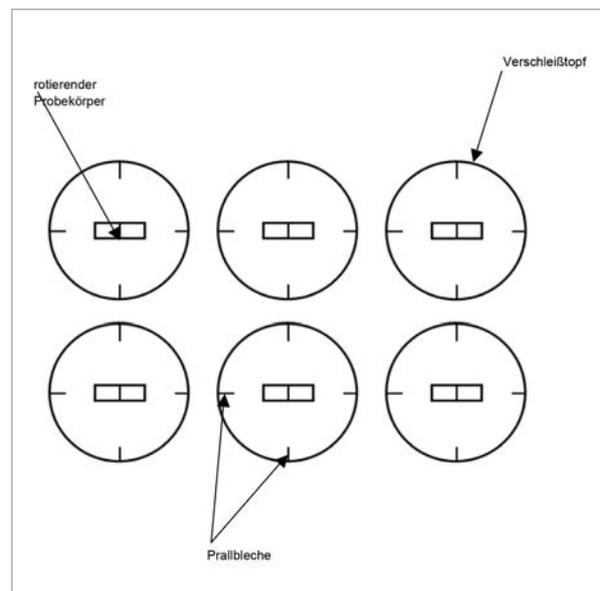


Abbildung 43: Prinzipieller Aufbau des Sand-Slurry-Tests

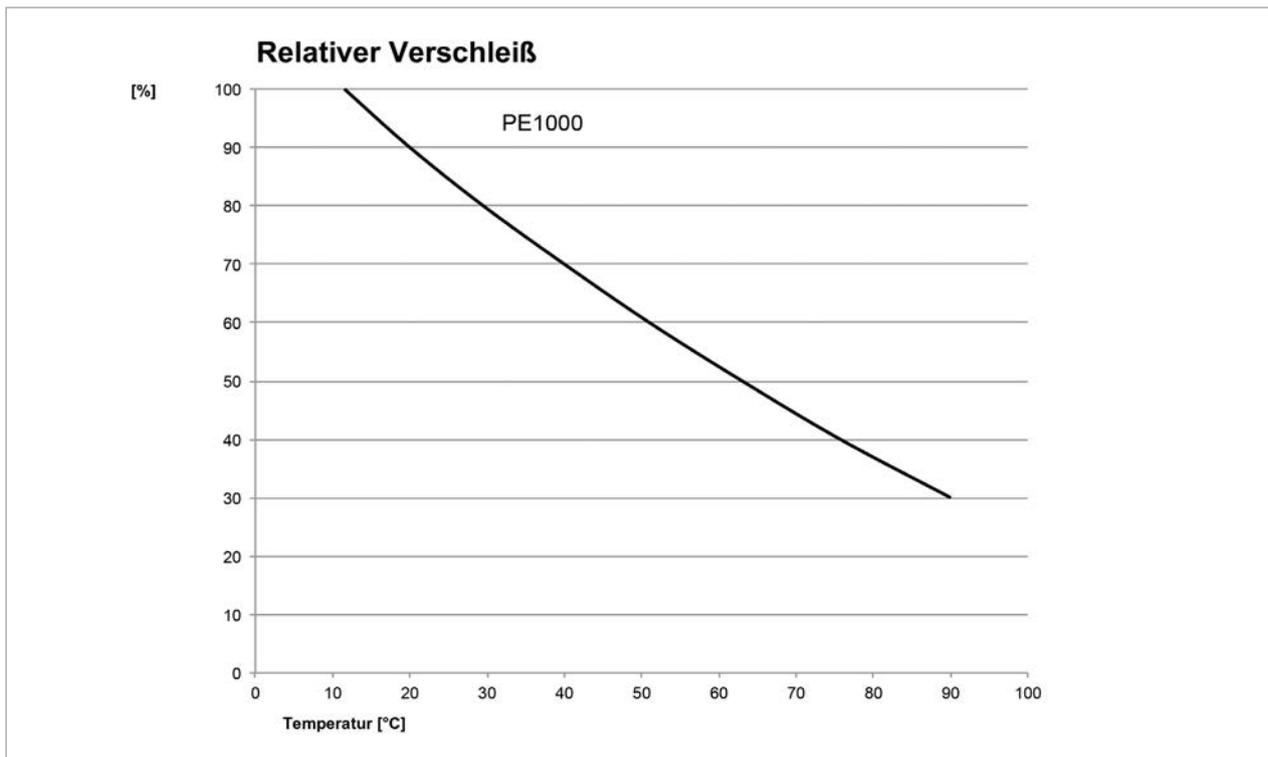


Abbildung 44: Relativer Verschleiß von Thermoplasten als Funktion der Temperatur

5.2 Thermische Eigenschaften

5.2.1 Wärmeleitung

Die Wärmeleitung bezeichnet einen Vorgang, bei dem Wärme innerhalb eines Stoffes von Ort A zu Ort B transportiert wird.

Dabei wird die Wärme immer von den Zonen höherer Temperatur zu Zonen niedrigerer Temperatur übertragen. Der Wärmeaustausch zwischen diesen Zonen findet, wenn er ungestört ablaufen kann, solange statt, bis sich ein Ausgleich eingestellt hat und der Körper eine einheitliche Temperatur aufweist.

Die Wärme, die eine Energieform darstellt, wird mit Schallgeschwindigkeit transportiert, die stoffspezifisch und vom E-Modul und der Dichte abhängig ist.

Aufgrund der geringen Dichte und der niedrigen Schallgeschwindigkeit sowie der niedrigen Wärmekapazität im Vergleich zu Metallen (die Wärmekapazität nimmt mit der elektrischen Leitfähigkeit zu) sind reine Kunststoffe im Allgemeinen schlechte Wärmeleiter und somit gute thermische Isolatoren.

	Material	Wärmeleitfähigkeit λ [W/(m · K)]
Kunststoff	Polyethylen, PE	0,50
	Polyamid, PA	0,30
	Polyurethan, PU	0,25
	Polypropylen, PP	0,23
	Polyvinylchlorid, PVC	0,17
Metalle	Silber	429
	Kupfer, rein	400
	Aluminium, rein	236
	Messing	120
	Eisen	80

Tabelle 6: Wärmeleitfähigkeit λ einiger Werkstoffe

5.2.1.1 Wärmekapazität

Die Wärmekapazität c wird in J/K angegeben und sagt aus, um wie viel °C bzw. K sich die Temperatur eines Körpers erhöht, wenn man ihm eine bestimmte Wärme zuführt.

Die spezifische Wärmekapazität C beschreibt die Fähigkeit eines Körpers, Wärme zu speichern. Sie gibt an, wie viel Wärme ein Material bei Temperaturänderung aufnimmt bzw. abgibt. Die Maßeinheit wird in J/(kg · K) angegeben. Die spezifische Wärmekapazität ist eine stoffspezifische Größe, die jedoch von verschiedenen Parametern, wie z.B. der Temperatur, abhängig ist. Aus diesem Grund wird die spezifische Wärmekapazität für ein Material oft bei einer bestimmten Temperatur angegeben.

5.2.1.2 Wärmeleitfähigkeit

Die Wärmeleitfähigkeit λ , auch Wärmeleitfähigkeit genannt, ist ein temperaturabhängiger Kennwert, der die Fähigkeit eines Materials, Wärme in seinem Inneren zu transportieren, zahlenmäßig erfasst. Sie wird in W/(m · K) angegeben. Die Wärmeleitfähigkeit kann mit Hilfe von Füllstoffen verbessert werden, wenn diese eine höhere Wärmeleitfähigkeit besitzen. Häufig werden dazu Kohlenstoffstaub, Graphit aber auch Metallfasern oder Metallpulver eingesetzt.

Besitzen die Füllstoffe anisotrope thermische Eigenschaften und die Möglichkeit, sich im Werkstoff zu orientieren, so erhält auch der gefüllte Kunststoff anisotrope thermische Eigenschaften. Dies kann beispielsweise bei Kunststoffen beobachtet werden, die mit Graphit gefüllt sind. Graphit ist thermisch anisotrop und orientiert sich aufgrund der Plättchenform und der Herstellbedingungen oftmals in Fließrichtung innerhalb des Werkstoffes.

5.2.2 Wärmedurchgang

Um die Wärmeübertragung durch eine Wand zu berechnen, sind neben der Wärmeleitung noch die Wärmeübergangskoeffizienten innerhalb und außerhalb der Wand sowie der Wärmedurchgangskoeffizient notwendig.

Der Wärmestrom j ergibt sich aus:

$$j = U \cdot A \cdot \Delta T$$

mit U = Wärmedurchgangskoeffizient
 A = Fläche der Wand
 ΔT = Temperaturdifferenz

Der Wärmedurchgangskoeffizient U (oder auch k-Wert) errechnet sich folgendermaßen:

$$U = \frac{1}{1/\alpha_i + s/\lambda + 1/\alpha_a}$$

mit s = Wanddicke
 λ = Wärmeleitfähigkeit
 $\alpha_{i,a}$ = Wärmeübergangskoeffizient innen, außen

Der Wärmeübergangskoeffizient α bestimmt die Wärmeübertragung auf eine Wand und hängt ganz entscheidend von der Art und der Geschwindigkeit des Mediums ab. Er ist vom Material der Wand völlig unabhängig. Je höher der Wärmedurchgangskoeffizient, desto schlechter ist die Wärmedämmeigenschaft des Stoffes. Umgekehrt, je niedriger der Wärmedurchgangskoeffizient, desto besser ist die Wärmedämmeigenschaft, bzw. desto höher ist der Wärmedurchgangswiderstand. Der Wärmedurchgangskoeffizient hat die Maßeinheit $W/(m^2 \cdot K)$.

5.2.3 Wärmeausdehnung

Werkstoffe verändern bei einer Temperaturänderung ihre Dimensionen wie Länge, Breite und Höhe und damit auch ihr Volumen. Da bei einer Temperaturänderung die Masse des Körpers die gleiche bleibt, sich das Volumen aber ändert, ändert sich zwangsläufig auch die Dichte des Werkstoffes. Bei Erwärmung dehnt sich ein Werkstoff aus, beim Abkühlen zieht er sich zusammen.

Die Ursache der Dimensionsänderung wird mit dem Schwingen der Atome in dem Material um einen Gleichgewichtspunkt herum erklärt. Mit steigender Temperatur nimmt die Schwingung der Höhe nach zu, der Werkstoff dehnt sich aus. Der lineare Ausdehnungskoeffizient ist

zwar eine stoffspezifische Materialkonstante, ist jedoch temperaturabhängig (Abbildung 45) und wird mit steigender Temperatur größer, so dass sich das Volumen eines Körpers mit steigender Temperatur überproportional verändert. Oft wird der lineare Ausdehnungskoeffizient über den Anwendungstemperaturbereich des Materials gemittelt und als „mittlerer thermischer Längenausdehnungskoeffizient“ angegeben.

Da der lineare Wärmeausdehnungskoeffizient von den Bindungsverhältnissen innerhalb eines Werkstoffes abhängt, kann er mit den elastischen Eigenschaften und dem Schmelzpunkt verknüpft werden.

Die Länge L eines Stabes wächst mit der Temperatur T nach folgender Beziehung:

$$L = L_0 \cdot (1 + \alpha \cdot T)$$

Dabei bedeutet L_0 die Länge des Stabes bei $T = 0$ K. Wird ein Kunststoff mit Füllstoffen oder Fasern vermischt, so ergibt sich im Allgemeinen aus der einfachen Mischungsregel der Ausdehnungskoeffizient α_c des gefüllten Kunststoffes:

$$\alpha_c = \alpha_k \cdot (1 - \varphi_k) + \alpha_f + \varphi_f$$

Dabei sind α_k und α_f die Ausdehnungskoeffizienten des Kunststoffes und des Füllstoffes sowie φ_k und φ_f die Volumenanteile des Kunststoffes und des Füllstoffes.

Typische mittlere thermische Ausdehnungskoeffizienten können Tabelle 7 entnommen werden:

Werkstoff	α [$10^{-6}/K$]
Glas	4
Stahl	12
Kupfer	18
Aluminium	24
Polypropylen	160
Polyethylen	180
PVDF	120
ECTFE	80
PVC	80
GFK	20 - 30
CFK	0 - 20

Tabelle 7: Mittlerer thermischer Ausdehnungskoeffizient einiger Werkstoffe

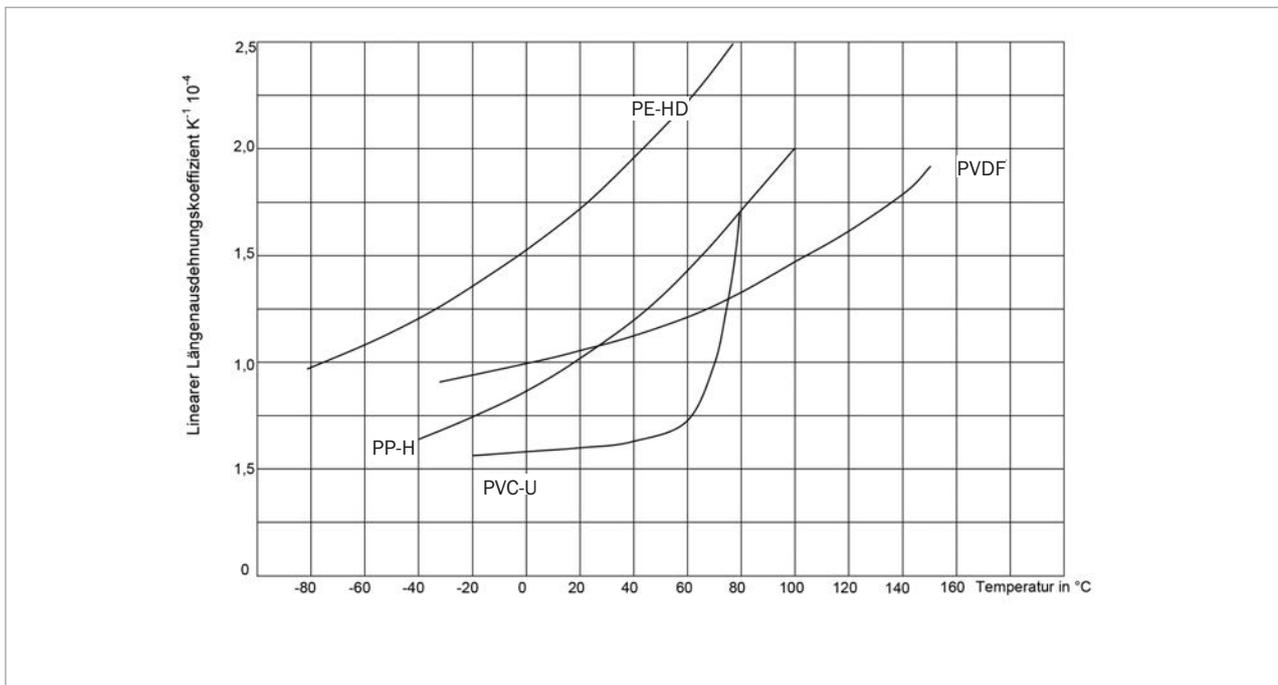


Abbildung 45: Linearer thermischer Ausdehnungskoeffizient als Funktion der Temperatur einiger Thermoplaste

5.2.4 Prüfung der Wärmeformbeständigkeit

Im Gegensatz zu Duroplasten sind die Eigenschaften der Thermoplaste sehr stark temperaturabhängig. Bei hohen Temperaturen gehen Thermoplaste in den plastischen Zustand über. Deshalb ist es für einen Konstrukteur bzw. Verarbeiter von Thermoplasten sehr wichtig, einen ungefähren Richtwert über die Grenztemperatur hinsichtlich der Formstabilität eines Werkstoffes zu erhalten. Die bei diesen Prüfungen ermittelten Temperaturen dürfen jedoch nicht als maximale Einsatztemperaturen angesehen werden, weil dabei z.B. mechanische Eigenschaften keine Berücksichtigung finden.

Bei der Prüfung der Wärmeformbeständigkeit von Kunststoffen wird hauptsächlich auf zwei Verfahren zurückgegriffen:

1. Vicat (DIN EN ISO 306)
2. Heat Distorsion Temperature (HDT) (ISO 75)

Wir können die Wärmeformbeständigkeit unserer Thermoplaste nach beiden Verfahren bestimmen.

Die **Vicat-Temperatur** ist die Temperatur, bei der die Vicat-Nadel (Spitze ca. 1 mm² Querschnittsfläche) unter einer bestimmten Belastung und einer definierten Heizrate 1 mm in den Werkstoff eingedrungen ist.

Bei der Ermittlung der **Heat Distorsion Temperature (HDT)** wird ein Probekörper in einem Ölbad hochkant auf zwei Lager aufgelegt. Mittig zwischen diesen beiden Lagern wird der Probekörper mit einer definierten Kraft belastet. Das Ölbad wird mit einer bestimmten Heizrate aufgeheizt. Die Temperatur, bei der der Probekörper eine Durchbiegung von 1 mm aufweist, wird als HDT abgelesen und angegeben.

5.3 Brandverhalten

Gemäß DIN 4102 wird in nicht brennbare (Klasse A) und brennbare Baustoffe (Klasse B) unterschieden. Kunststoffe sind ohne Ausnahme zu letzteren zu zählen.

Die Klasse B wird eingestuft in:

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

Zur Einhaltung der Brandschutzverordnungen werden in Deutschland für öffentliche Gebäude, Messen, usw. Materialien vorgeschrieben, die die Schwerentflammbarkeit (B1) nach DIN 4102 erfüllen.

5.3.1 Brandprüfung nach DIN 4102

Für Baustoffe mit Ausnahme von Wandbekleidungen und Bodenbelägen, die in der DIN 4102 separat behandelt werden, stellt die B1-Prüfung im Prinzip den Brand eines Gegenstandes in einer Ecke eines Raumes dar. Hierbei muss die Wärmeabgabe an den Raum und die Brandausbreitung begrenzt sein. Die B1-Prüfung findet im Brandschacht statt. Dieser ist quadratisch und insgesamt ca. 2.500 mm hoch. An jede Seite des quadratischen Brandschachtes wird in einer bestimmten Höhe je eine Probe senkrecht so befestigt, dass der Abstand des quadratischen Brenners, der sich unterhalb der Proben befindet, 25 mm ± 1 mm zur Probe beträgt. Die Beflammung findet über einen Zeitraum von 10 Minuten statt. Bei der Auswertung des Versuchs werden unter anderem die verbleibende Restlänge der Probekörper, das eventuelle Abtropfverhalten und die mittlere Rauchgastempera-

tur beurteilt. Hierbei dürfen bestimmte Grenzwerte nicht überschritten werden.

Die B1-Prüfung für Baustoffe gilt als bestanden, wenn diese Brandschachtprüfung und die Anforderungen nach B2 (stellt die Beanspruchung z.B. durch eine Streichholzflamme dar) bestanden sind.

Die Fähigkeit, die Brandschachtprüfung zu bestehen, nimmt bei gleichem Material mit steigender Plattendicke ab.

Ein weiteres Beurteilungskriterium ist die Angabe des Sauerstoffindex (LOI = Limiting Oxygen Index, DIN EN ISO 4589). Diese Zahl gibt die Mindestsauerstoffkon-

zentration in einem Sauerstoff-Stickstoff-Gemisch an, bei der die Verbrennung unterhalten wird. Das bedeutet, dass nur bei einem Sauerstoffbedarf $\leq 20,8\%$ (Sauerstoffgehalt in der Atmosphäre) mit Hilfe einer Zündquelle eine Entzündung erfolgt und ein Weiterbrennen nach Entfernen dieser Zündquelle möglich ist.

In Tabelle 8 sind Sauerstoffindizes und Einstufungen zum Brandverhalten aufgeführt, die durch unterschiedliche Prüfverfahren ermittelt wurden:

- DIN 4102 in der Brandschachtanlage
- DIN 53438 durch Kanten- (K) und Flächenbeflammung (F)
- UL 94 (US-Prüfnorm)

Werkstoff	Brandverhalten nach DIN 4102 Klasse*	Sauerstoffindex nach ASTM 2863	Bewertung nach UL 94 Klasse*	Bewertung nach DIN 53438 Klasse	
PE-HD	B2	18			
PE-EL	B2	18			
PP-H	B2	18			
PP-B	B2	18			
PPs	B1	28		F1	K1
PVC	B1	40	V0		
PVDF	B1	60	V0		
ECTFE	B1	52			

* Details zur Verfügbarkeit der Prüfzeugnisse siehe Kapitel 4 Werkstoffkennwerte

Tabelle 8: Beurteilung des Brandverhaltens

5.3.2 SBI-Test nach DIN EN 13823

Der SBI-Test (Single Burning Item) ist als neuer Test im europäischen Raum eingeführt und wird die nationalen Brandtests nach einer noch zu bestimmenden Übergangsfrist ablösen. Zum Zeitpunkt der Erstellung dieses technischen Handbuchs gab es in der Bauregelliste des DIBt (Deutsches Institut für Bautechnik) noch keine Anforderung bezüglich SBI an die Bauprodukte.

Die DIN EN 13823 beschreibt die Prüfungen zum Brandverhalten von Bauprodukten, während die DIN EN 13501-1 die Klassifizierung von Bauprodukten und Bauarten zu ihrem Brandverhalten behandelt. Letztere wird auf drei Kategorien von Bauprodukten angewendet, die getrennt behandelt werden:

1. auf Bauprodukte mit Ausnahme von Bodenbelägen und Rohrisolierungen,
2. auf Bodenbeläge und
3. auf Rohrisolierungen.

Der Test beurteilt im Prinzip, welchen Beitrag ein bestimmtes Bauprodukt zu einem sich entwickelnden Brand leistet. Dabei wird angenommen, dass der Brand von einem in einer Ecke stehenden, brennenden Gegenstand ausgelöst wird, so wie in Abbildung 46 dargestellt.

Der Test besteht aus zwei Wänden 0,5 m x 1,5 m und 1,0 m x 1,5 m, die rechtwinklig zueinander angeordnet sind und in Metallrahmen positioniert werden.

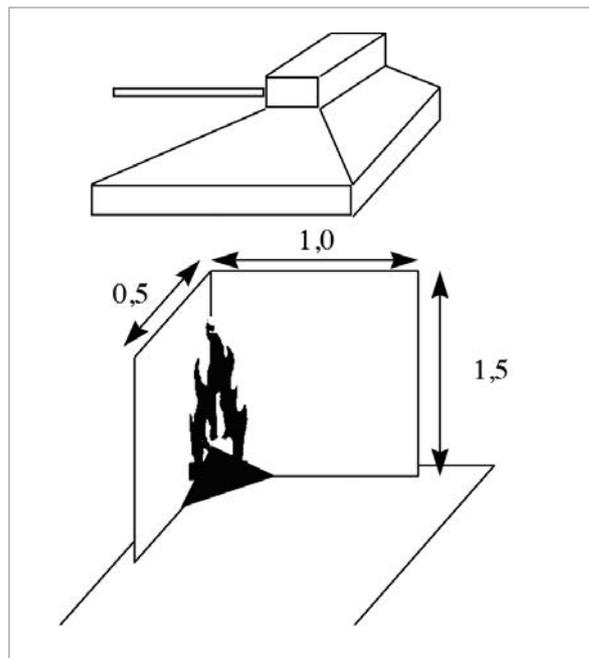


Abbildung 46: Schematische Darstellung des SBI-Tests

Während des Tests werden kalorimetrische Messungen und Daten des Rauchgases aufgezeichnet und an Hand dieser Aufzeichnungen die Einteilung in die in der DIN EN 13501-1 aufgeführten Klassifizierungen vorgenommen.

In der DIN EN 13501-1 sind insgesamt sieben Brandklassen zur Einteilung der einzelnen Bauprodukte aufgeführt. Die Klassen A1 und A2 betreffen ausschließlich nichtbrennbare Stoffe. Für brennbare Baustoffe wurden die Klassen B, C, D, E und F kreiert.

Wichtige Kenngrößen für Produkte, die im SBI-Test klassifiziert werden, sind:

- die Feuerausbreitung (fire growth rate, FIGRA)
- die totale Wärmefreisetzung (total heat release, THR)
- die seitliche Flammenausbreitung (lateral flame spread, LFS)
- die Rauchentwicklung (smoke growth rate, SMOGRA)
- die totale Rauchentwicklung (total smoke production, TSP)
- die Entstehung von brennend abfallenden Tropfen/Partikeln

Für die Klassen B bis D sind sämtliche dieser Kriterien näher definiert. Für die Klasse E, die als Einstieg in den SBI-Test zu werten ist, muss lediglich der Kleinbrennertest EN ISO 11925-2 (vergleichbar DIN 4102 B2) erfüllt werden. Erfüllt ein Produkt die Klasse E nicht, so ist ein weitergehender SBI-Test nicht möglich. In der Klasse F sind keine Kriterien zu erfüllen. Das Bauprodukt wird ebenfalls in die Klasse F eingestuft, wenn Klasse E nicht erreicht wird.

Die Rauchentwicklung SMOGRA wird in drei Stufen eingeteilt:

- s1 = SMOGRA $\leq 30 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$, TSP $\leq 50 \text{ m}^2$
- s2 = SMOGRA $\leq 180 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$, TSP $\leq 200 \text{ m}^2$
- s3 = erfüllt weder s1 noch s2

Das Ereignis von brennend abfallenden Tropfen wird ebenfalls in drei Stufen charakterisiert:

- d0 = keine brennenden Tropfen innerhalb 600 s
- d1 = keine brennenden Tropfen für länger als 10 s innerhalb 600 s
- d2 = weder d0 noch d1

Falls im Kleinbrennertest das Papier durch brennend abtropfende Partikel entzündet wird, muss dieses Produkt automatisch in d2 eingestuft werden. Damit hat dieses Produkt aber auch den Kleinbrennertest nicht erfüllt und wird automatisch in Klasse F eingestuft. Eine entscheidende Änderung des SBI-Tests zu nationalen Testmethoden sollte die Einführung eines Tests für Produkte und ihre Endanwendungen sein. Die meisten sonst üblichen Tests konzentrierten sich auf die Klassifizierung der Werkstoffe. Dabei sollte ebenfalls beachtet werden, dass Produkte, die sich bis heute ohne erkennbare Sicherheitsmängel im Markt behauptet haben und als brauchbar klassifiziert wurden, auch weiterhin in diesen Anwendungen Verwendung finden dürfen. Ungeachtet aller Vorbehalte wird es nach Einführung des SBI-Tests notwendig sein, sämtliche Produkte, die bislang als Bauprodukte mit besonderen Brandeigenschaften eingesetzt wurden, erneut zu testen und zuzulassen.

5.3.3 Brandtest nach FM 4910

Speziell für die Halbleiterindustrie bestehen hohe Anforderungen an den Brandschutz, da Produktionsausfälle enorme Kosten verursachen. „Factory Mutual Global“ ist ein amerikanischer Industrierversicherer, der untersucht, ob Kunststoffe mit einer geringen Brandlast als Konstruktionswerkstoff in der Halbleiterindustrie eingesetzt werden können.

Die Brandlast wird in einem sogenannten „small scale test“ ermittelt. Er besteht aus einem speziellen Ofen (Glasröhre), in dem die Proben verbrannt werden. Die entstehenden Gase werden während des Brandvorgangs analysiert und dienen der Beurteilung des Kunststoffes. Als Kriterien gelten:

- der Ausbreitungsindex (Fire Propagating Index), $FPI \leq 6$
- die Rauchentwicklung (Smoke Damage Index) $SDI \leq 0,4$
- die Korrosionswirkung (Corrosion Damage Index) $CDI \leq 1,1$

Viele Halbzeughersteller werden verpflichtet, einen Nachweis über die Eignung ihres Halbzeugs gemäß FM 4910 vorzulegen, damit dieses Material in Reinräumen der Halbleiterindustrie eingesetzt werden kann.

Die SIMONA AG hat die Zertifizierung für PVDF Rohre, Formteile, Platten und Schweißdrähte sowie für CPVC Platten aus einem FM 4910 zertifizierten Rohstoff vorliegen.

5.3.4 Brandprüfungen nach UL 94

Auf dem US-amerikanischen Markt gelten die Prüfungen nach dem UL 94 Standard. UL steht dabei für das Testlabor „Underwriters Laboratories“. Danach werden die Brandeigenschaften von Kunststoffen unter verschiedenen Bedingungen untersucht und beurteilt.

In dem Versuch UL 94 HB (HB = Horizontal Burning) wird die Brenngeschwindigkeit über eine bestimmte Strecke in Abhängigkeit der Plattendicke eines horizontal eingespannten Kunststoffprobekörpers bestimmt. In dem Versuch UL 94 V (V = Vertical) wird der Probekörper, der senkrecht über einem Wattebausch eingespannt ist, für 2 x 10 Sekunden beflammt.

Gemessen werden die Nachbrennzeit nach der Beflammung, die Summe der Nachbrennzeiten (10 Probekörper), das Nachbrennen und Nachglühen, das eventuelle Abtropfverhalten und die Menge des abgebrannten Materials. Je nach Ergebnis wird der Kunststoff in die

Klasse V0 (höchste Anforderung), V1 oder V2 (niedrigste Anforderung) eingestuft. Tritt während des Versuchs ein brennendes Abtropfen auf und entzündet die darunterliegende Watte, so kann dieses Material, unabhängig von den anderen Messwerten, nicht mehr in Klasse V0 oder V1 eingestuft werden. Im Gegensatz zu der Brandprüfung nach DIN 4102 B1, nimmt die Fähigkeit eines Materials die UL 94 V0 zu erreichen, mit steigender Wanddicke zu. Aus diesem Grund gilt die Prüfung für alle Dicken des gleichen Materials als bestanden, die oberhalb der geprüften Materialdicke liegen. Ist z.B. ein 1 mm dicker Probekörper nach dem UL 94 V-Test in die Klasse V0 eingestuft, steht auf dem Prüfzeugnis bei der Materialdicke ≥ 1 mm.

Erreicht der Kunststoff mindestens die Klassifizierung UL 94 V2, können weitere Prüfungen und dann auch Klassifizierungen durchgeführt werden, wie:

- **5VB:** fünfmalige Beflammung mit jeweils 5 Sekunden eines vertikal eingespannten Probekörpers, wobei kein Abtropfen zulässig ist
- **5VA:** wie 5VB, mit zusätzlichem Test eines horizontal eingespannten Probekörpers, wobei weder ein Abtropfen, noch die Bildung von Brandlöchern mit einem Durchmesser von > 1 mm zulässig ist

Da sich der Prüfaufbau für die Einstufung nach der DIN 4102 von dem der UL 94 unterscheidet, ist eine generelle Aussage „wenn das Material die B1 besteht, besteht es auch die UL 94 V0“ oder umgekehrt, nicht möglich und nicht zulässig. Gleiches gilt auch für Brandprüfungen anderer Länder, wenn diese eigene Prüfvorschriften haben.

5.4 Permeation

Kunststoffe sind aufgrund ihrer geringen Dichte für Gase und Flüssigkeiten im Vergleich zu Metallen und Mineralien verhältnismäßig durchlässig. Der Stofftransport durch eine Membran heißt **Permeation**, wobei unter einer Membran eine Schicht verstanden wird, die dem Transport eines Gases oder einer Flüssigkeit einen merklichen Widerstand entgegensetzt. Die Permeation setzt sich aus der Adsorption, der Absorption, der Diffusion und der Desorption zusammen. Unter **Adsorption** versteht man das Anlagern eines Stoffes an der Oberfläche einer Membran. Dringen Gase oder Flüssigkeiten nicht allein zur Oberfläche einer Membran vor, sondern lösen sich auch in der Membran, so spricht man von **Absorption**. Die **Diffusion** beschreibt den Transport eines Stoffes durch die Membran zur gegenüberliegenden Grenzfläche. Die **Desorption** ist die Umkehrung der Adsorption und bedeutet die Abgabe eines Stoffes aus der Membranoberfläche an die Umgebung.

Die Adsorption kann für kleine Konzentrationen und monomolekulare Schichten anhand der **Henryschen Isotherme** beschrieben werden, in der die an der Oberfläche adsorbierte Menge c proportional zum Partialdruck p des Adsorbens ist:

$$c = S \cdot p$$

mit S = Sorptionskonstante

Für höhere Konzentrationen wird die **Langmuir Isotherme** verwendet.

$$c = \frac{S \cdot p}{1 + S \cdot p}$$

Die Menge, die ein Werkstoff absorbieren kann, ist von der chemischen Struktur des Werkstoffes abhängig. Gerade Kunststoffe neigen jedoch dazu, insbesondere Lösemittel in erhöhtem Maße zu absorbieren und aufgrund dessen zu quellen.

Die Diffusion wird mit Hilfe des 1. und 2. Fick'schen Gesetzes beschrieben. Das **1. Fick'sche Gesetz** besagt, dass sich eine Massenstromdichte $j = dm/dt$, d.h. die Masse der Teilchen m , die durch eine konstante Fläche A pro Zeiteinheit diffundiert, mit der Zunahme des Konzentrationsgefälles dc/dx erhöht:

$$j = -D \cdot A \cdot \frac{dc}{dx}$$

Die Konstante D wird als Diffusionskonstante bezeichnet.

Das **2. Fick'sche Gesetz** besagt, dass die zeitliche Änderung der Konzentration dc/dt proportional der örtlichen Änderung der Massenstromdichte dj/dx ist:

$$\frac{dc}{dt} = -D \cdot \frac{dj}{dx}$$

Herrscht zwischen den beiden Seiten einer Membran der Dicke $dx = s$ und Fläche A die Konzentrationsdifferenz Δc , so diffundiert durch die Membran ein Massenstrom:

$$\frac{\Delta m}{\Delta t} = D \cdot A \cdot \frac{\Delta c}{s}$$

Ersetzt man nun c durch die Druckdifferenz $\Delta p = p_2 - p_1$ zwischen der Membran und führt die Permeationskonstante $P = D \cdot S$ ein, so erhält man:

$$\frac{\Delta m}{\Delta t} = P \cdot A \cdot \frac{\Delta p}{s}$$

P errechnet sich dann zu:

$$P = D \cdot S = \frac{\Delta m \cdot s}{A \cdot \Delta t \cdot \Delta p}$$

Die Diffusion, Sorption und folglich auch die Permeation sind eine Funktion der Temperatur und gehorchen der Arrhenius-Beziehung:

$$D = D_0 \cdot \exp\left(\frac{-E_D}{R \cdot T}\right)$$

$$S = S_0 \cdot \exp\left(\frac{-E_S}{R \cdot T}\right)$$

$$P = P_0 \cdot \exp\left(\frac{-E_P}{R \cdot T}\right)$$

R ist in obigen Formeln die allgemeine Gaskonstante. Die Konstanten D_0 , S_0 und P_0 sind Materialkonstanten und in der Regel unabhängig von der Temperatur T, den Aktivierungsenergien E_i ($i = D, S, P$) und der Konzentration c des Absorbens in der Membran. Kennzeichnend in obiger Berechnung des Permeationsgleichgewichtes ist, dass die Absorption vernachlässigt wird, da bei der Betrachtung ein stationäres Gleichgewicht vorausgesetzt wird.

In Elastomeren ist die Diffusion jedoch abhängig von der Konzentration c, so dass obige Gleichungen nicht mehr in dieser einfachen Form über längere Zeiträume gelten.

Die experimentelle Bestimmung der Permeationskonstanten P kann durch die Messung der Masse, die durch die Membran permeiert, als Funktion der Zeit t bestimmt werden.

Liegen mehrere Folien hintereinander, so ergibt sich der resultierende Permeationskoeffizient P zu:

$$\frac{1}{P_{ges}} = \frac{1}{S_{ges}} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{S_i}{P_i}$$

n = Anzahl der Schichten

S_{ges} = Gesamtdicke der Membran

S_i = Dicke der i-ten Einzelschicht

P_i = Permeation der i-ten Schicht

5.5 Wasseraufnahme

Die Werkstoffe PE, PP, PVDF und ECTFE sind wasserabweisend. Eine Quellung und somit eine Änderung der Dimensionsstabilität erfolgt nicht. Bei 24-stündiger Wasserlagerung nach DIN 53495 wird lediglich eine geringfügige Wasseraufnahme festgestellt (< 0,1 Ma.-%).

Bei PVC ist eine minimal höhere Wasseraufnahme bei Wassereinlagerung gegeben. Eine Änderung der Maße erfolgt dabei nicht. Die mechanischen Werte ändern sich nur geringfügig. Für die meisten Anwendungsfälle ist dies ohne Bedeutung.

Vorsicht ist jedoch beim Schweißen oder beim Tiefziehen geboten, wenn das zu verarbeitende Material Feuchtigkeit aufgenommen hat. Die Gefahr der Feuchtigkeitsaufnahme steigt mit der Lagerdauer und mit dem Rußgehalt des Materials (z.B. PE-EL). Beim Erhitzen von Materialien, die Feuchtigkeit aufgenommen haben, kann es bei der Verarbeitung (Schweißen bzw. Tiefziehen) zu einer Blasenbildung kommen. Falls dies auftritt, so kann durch Trocknen des Schweißdrahts oder des Halbzeugs Abhilfe geschaffen werden.

5.6 Elektrische Eigenschaften

5.6.1 Elektrische Leitfähigkeit

Kunststoffe sind nicht nur gute thermische sondern auch gute elektrische Isolatoren. Der spezifische Widerstand, der sich gemäß dem Ohmschen Gesetz nach $R = U/I$ berechnen lässt (R = elektrischer Widerstand, U = Spannung, I = Strom), beträgt für Kunststoffe 10^{10} bis 10^{20} Ωcm . Interessant ist, dass sich der Widerstand eines Kunststoffes aufgrund von Polarisationsvorgängen mit der Zeit stetig zu niedrigeren Werten verändert. Daher liest man den Wert des Oberflächenwiderstandes gemäß DIN IEC 60093, Abs. 10.2 eine Minute nach Anlegen der Gleichspannung ab.

Bei einigen speziellen Anwendungen ist jedoch zumindest eine geringe elektrische Leitfähigkeit wünschenswert. Es handelt sich hierbei häufig um die Ableitung von elektrostatischen Aufladungen in explosionsgeschützten Räumen. Hier kann man sich, ähnlich wie bei der thermischen Leitfähigkeit, mit elektrisch leitenden Füllstoffen helfen. Sie müssen jedoch in so großer Menge eingebracht werden, dass zwischen den einzelnen Füllstoffteilchen ein Kontakt entsteht, der den Strom weiterleitet. Außerdem muss gesichert sein, dass die Füllstoffe einen Kontakt nach außen haben. Ist dieser Kontakt nach außen oder innen nicht gewährleistet, so ergibt sich eine elektrische Leitfähigkeit erst bei höheren Spannungen, bei der die Durchschlagfestigkeit der Kunststoffschichten zwischen Umgebung und Füllstoff oder zwischen den Füllstoffen überschritten wird. Als Füllstoffe eignen sich alle elektrisch leitenden Werkstoffe wie Graphite, Ruße und Metalle. Im Handel werden aber auch zunehmend leitfähige Pigmente angeboten. Sie bestehen aus Mine-

ralien, die mit metallischen oder halbleitenden Werkstoffen beschichtet sind. Sie eignen sich jedoch häufig lediglich für dünne Schichten wie Anstriche.

5.6.2 Dielektrische Eigenschaften

Betrachtet man einen Plattenkondensator (Abbildung 47), der aus zwei parallel zueinander aufgebauten, metallischen Platten besteht, so kann dieser mit Hilfe einer angelegten Spannung aufgeladen werden. Die im Kondensator gespeicherte Ladung Q ist proportional zur angelegten Spannung U :

$$Q = C \cdot U$$

Die Konstante C wird als Kapazität bezeichnet und ist proportional zur Plattenfläche A und umgekehrt proportional zum Plattenabstand d :

$$C = \epsilon_0 \cdot \frac{A}{d}$$

Die Konstante ϵ_0 wird als Dielektrizitätskonstante des Vakuums bezeichnet. Sie beträgt $8,9 \cdot 10^{-12} \text{ A} \cdot \text{s} \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$.

Befindet sich zwischen den Platten ein Werkstoff, ein „Dielektrikum“, so ändert sich die Kapazität des Kondensators in Abhängigkeit von den dielektrischen Eigenschaften des Werkstoffes:

$$C = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \frac{A}{d}$$

Die Konstante ϵ_r wird als relative Dielektrizitätszahl bezeichnet und ist der Quotient aus der Kapazität mit Dielektrikum $C_{\text{Dielektrikum}}$ und der Kapazität im Vakuum C_{Vakuum} :

$$\epsilon_r = \frac{C_{\text{Dielektrikum}}}{C_{\text{Vacuum}}}$$

Durch ein Dielektrikum erhöht sich in der Regel die Kapazität eines Kondensators, d.h. ϵ_r ist für viele Werkstoffe größer als 1.

Wird die Spannungsquelle vom Kondensator entfernt, so bleibt die Gesamtladung aufgrund der Energieerhaltung konstant und die Spannung, die an den Kondensatorplatten zu messen ist, sinkt durch ein zwischen den Platten befindliches Dielektrikum.

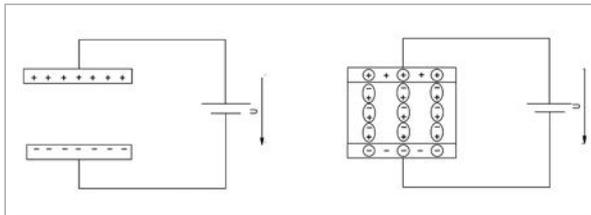


Abbildung 47: Kondensatoranordnung mit Polarisationsladungen; a) ohne Dielektrikum; b) mit Dielektrikum

Der Grund dieser Erscheinung ist mit Hilfe des atomaren Aufbaus verschiedener Substanzen zu erklären. Viele Stoffe besitzen aufgrund der chemischen Bindungen permanente oder induzierte elektrische Dipolmomente. Diese Dipolmomente, auch Polarisationsladungen genannt, lassen sich in einem elektrischen Feld, wie es innerhalb eines Kondensators herrscht, orientieren. Man spricht in diesem Fall von der Polarisierbarkeit des Dielektrikums. Die Dipole orientieren sich durch Influenz nun derart, dass den Oberflächenladungen an den Kondensatorplat-

ten entgegengesetzte Ladungen gegenüberstehen und das elektrische Feld innerhalb des Kondensators um den Faktor $1/\epsilon_r$ herabgesetzt wird.

Die Dielektrizitätszahl ist dann wichtig, wenn es um den Einsatz eines Werkstoffes im Hochfrequenzfeld geht. Durch die Wechselfelder werden die Dipolmomente im elektrischen Feld bewegt (Umpolarisation) und es kommt zur Erwärmung des Dielektrikums. Die relative Dielektrizitätszahl wird daher analog der mechanischen Dämpfung in komplexer Weise dargestellt:

$$\epsilon_r = \epsilon_r' + i\epsilon_r''$$

Die Dielektrizitätskonstante ϵ_r' kennzeichnet dabei den reversiblen Anteil und ϵ_r'' den irreversiblen Dämpfungsanteil. Bei der Strom-Spannungskurve eines verlustfreien Kondensators eilt die Spannung dem Strom um 90° voraus. Mit dielektrischem Verlust eilt die Spannung dem Strom nur noch mit dem Winkel $\varphi = 90^\circ - \delta$ voraus. Der Wert $\tan \delta$ wird Verlustfaktor genannt und gehorcht folgender Beziehung:

$$\tan \delta = \frac{\epsilon_r''}{\epsilon_r'}$$

Da die dielektrischen Verlustfaktoren vieler ungefüllter Kunststoffe unter 10^{-3} liegen, eignen sie sich ganz besonders für die elektrische Isolation im Hochfrequenzbereich.

5.6.3 Elektrische Durchschlagfestigkeit E_d nach DIN 53481 / VDE 0303-1

Aufgrund häufiger Anwendungen im elektrotechnischen Bereich ist es besonders wichtig, eine Aussage darüber zu erhalten, bis zu welcher Wechselspannung eine elektrische Isolation gewährleistet ist, bevor der Werkstoff zerstört wird.

Die Durchschlagfestigkeit ist das Verhältnis von Durchschlagspannung U_d (Spannung, die den zu prüfenden Werkstoff zerstört) und Probendicke. Die Durchschlagspannung und somit auch die Durchschlagfestigkeit sind spezifische Stoffeigenschaften. Sie sind weiterhin von der Probendicke, der Umgebungstemperatur, dem Luftdruck und der Geschwindigkeit der Spannungssteigerung abhängig. Dabei zeigt sich ein nicht lineares Verhalten von Plattendicke zur Durchschlagfestigkeit.

5.6.4 Elektrische Kriechstromfestigkeit nach DIN 53480 / VDE 0303-1

Bei Verwendung unmodifizierter Thermoplaste für elektrotechnische Anwendungen (z.B. im elektrotechnischen Schaltschrankbau) sind bei ständigem Gebrauch Verschmutzungen nicht auszuschließen. Diese können die Grundlage für das Entstehen von Kriechströmen auf der Oberfläche des isolierenden Materials bilden. Sichtbares Zeichen solcher Ströme sind sogenannte Kriechspuren, die aufgrund thermischer Zersetzung des betroffenen Isolierstoffes entstehen (Verkohlung oder wellenartige Aushöhlung). Als Kriechstromfestigkeit wird die Widerstandsfähigkeit des betreffenden Stoffes gegen Kriechspurbildung bezeichnet.

5.6.5 Elektrostatische Aufladung

Innerhalb vieler Einsatzbereiche werden SIMONA® Thermoplaste Belastungen in Form von mehr oder weniger starker Reibung ausgesetzt. Dabei kann es zu elektrostatischen Aufladungen kommen. Aufgrund des verhältnismäßig hohen Oberflächenwiderstandes fließen die Ladungen an der Oberfläche nur sehr langsam ab und lösen eventuell Funkenentladungen aus (Explosionsgefahr). Gleichzeitig wird durch die statische Aufladung Staub angezogen, was die Oberfläche bei bestimmten Anwendungsfällen unansehnlich machen kann. Abhilfe wird dadurch geschaffen, dass die Leitfähigkeit des Werkstoffes entweder durch Zugabe von Antistatika (innere Ausrüstung) oder durch eine Oberflächenmodifizierung erhöht wird. Antistatische SIMONA® Thermoplaste sind ausschließlich mit einer inneren Ausrüstung versehen, die eine langjährige Wirkung gewährleistet. Wir weisen bei dieser Art antistatisch ausgerüsteter Thermoplaste darauf hin, dass die genannten Eigenschaften von der Luftfeuchte abhängig sind.

6 Chemische Eigenschaften

In der chemischen Industrie werden Kunststoffe in der Regel wegen ihrer chemischen Resistenz gegenüber chemisch aggressiven Medien eingesetzt. Dies bedeutet, dass sich die Kunststoffe unter Einwirkung von bestimmten Medien nicht soweit verändern dürfen, dass ihre Funktionsfähigkeit eingeschränkt wird.

Im Allgemeinen nimmt die Intensität des chemischen Angriffs bei Erhöhung von Temperatur und Konzentration sowie mit zunehmender Einwirkungsdauer zu.

Kunststoffe gehören zu den organischen Werkstoffen und haben daher relativ niedrige Bindungskräfte, die durch entsprechende Chemikalien negativ beeinflusst werden können. Neben den chemischen Medien können Veränderungen der Kunststoffe auch durch UV-Licht, Wärme und Sauerstoff oder auch durch die Kombination dieser Einflussfaktoren hervorgerufen werden. Die Folge wird eine vorzeitige Alterung und damit eine verkürzte Lebensdauer sein.

Bedingt durch die unterschiedliche atomare Zusammensetzung der verschiedenen Kunststoffmoleküle differieren auch deren chemische Widerstandsfähigkeiten. So reagieren Polyolefine (Kunststoffe, die nur aus Kohlenstoff und Wasserstoff aufgebaut sind, wie z.B. PE und PP, siehe Kapitel 3.1 und 3.2) mit oxidierend wirkenden Medien, wie z.B. Chromsäure, mit einer Materialversprödung bis hin zum Auftreten von Spannungsrissen. Gegenüber Alkalien, wie z.B. Natronlauge, ist PE bei Raumtemperatur sehr gut geeignet. PVC-U (weichmacherfreies PVC) ist gut geeignet für den Kontakt mit oxidierend wirkenden Medien, wie z.B. Wasserstoffperoxid oder 96 %-iger Schwefelsäure. Gegenüber vielen Lösungsmitteln, wie z.B. Aceton, ist PVC-U in der Regel nicht oder nur eingeschränkt geeignet. PVDF ist gut geeignet für den

Kontakt mit stark oxidierend wirkenden Medien, wie z.B. Chromsäure oder Chlor. Weniger gut geeignet ist PVDF im alkalischen Bereich, wie z.B. bei Natronlauge. PVDF kann bei Anwesenheit von Alkalien innerhalb kurzer Zeit mit dem Auftreten von Spannungsrissen reagieren. Die chemische Widerstandsfähigkeit von ECTFE liegt in der Regel oberhalb der von PVDF. Im Gegensatz zu PVDF zeigt ECTFE auch eine gute Widerstandsfähigkeit bei alkalischen Medien. In der Regel steigt die chemische Widerstandsfähigkeit mit dem Fluoranteil im Kunststoffmolekül.

Bei der Auswahl eines Kunststoffes für eine bestimmte Anwendung müssen nicht nur das Medium, sondern auch weitere Parameter bekannt sein, wie z.B.:

- Einzelchemikalie oder Mischung
- Konzentration des Mediums
- Anwendungstemperatur (Schwankungen)
- mechanische Belastung wie z.B. Druck, dynamische Belastung
- Einwirkdauer (dauernd / kurzzeitig)
- Innen- oder Außeneinsatz
- Einsatz in einem Ex-Bereich
- Kontakt mit Lebensmitteln
- Anforderungen an eine bestimmte Brandklasse
- Anforderungen an andere Zulassungen
- Abrasion
- Diffusion

Wenn ein Medium den Kunststoff schädigt, kann sich diese Schädigung unterschiedlich äußern, wie z.B. durch:

- Massenzunahme (meist Quellung)
- Massenabnahme bis hin zum Auflösen
- Verfärbung (bei Fluorkunststoffen muss dies nicht mit einer Schädigung einhergehen)

- Versprödung / Bildung von Spannungsrisse
- Vernetzung

Liegen keine Erfahrungswerte zum Verhalten des Kunststoffes gegenüber dem Medium vor, kann kurzfristig nur eine Abschätzung erfolgen. Für eine genauere Aussage ist ein Einlagerungsversuch, entweder im Labor oder vor Ort, notwendig.

Zur Beurteilung der chemischen Widerstandsfähigkeit von Thermoplasten gibt es verschiedene Normen, wie z.B.:

- ISO 4433
- DIN 16888
- DIN EN ISO 175

Nach diesen Normen werden die Probekörper spannungsfrei eingelagert. Eine Aussage zu einem möglichen spannungsrisseauslösenden Effekt ist daher nach diesen Normen nur eingeschränkt bis gar nicht möglich.

Die SIMONA® Halbzeuge können im hauseigenen Labor gemäß der ISO 4433 geprüft und beurteilt werden. Als Maßstab für die Beurteilung der chemischen Widerstandsfähigkeit dienen Änderungen der Masse und der mechanischen Eigenschaften (E-Modul, Streckspannung, Dehnung bei Streckspannung und Reißdehnung). Die chemischen Beständigkeiten sind in unserer Datenbank SIMCHEM aufgeführt (www.simchem.de).

Um eine mögliche spannungsrisseauslösende Eigenschaft eines zu prüfenden Mediums beurteilen zu können, werden bei unseren Einlagerungen zusätzlich unter Spannung gesetzte Probekörper mit in das jeweilige Medium eingelagert.

Eine Aussage zur Bestimmung der Beständigkeit gegen umgebungsbedingte Spannungsrissebildung (ESC) liefert die DIN EN ISO 22088.

Die eben erwähnten Normen zur Bestimmung der chemischen Widerstandsfähigkeit und zur Bestimmung der umgebungsbedingten Spannungsrissebildung können bei einer Materialeinlagerung keinen zahlenmäßigen Messwert liefern, um den Einfluss des Mediums auf den Thermoplast bei der rechnerischen Behälterauslegung zu berücksichtigen.

Um den Einfluss des Mediums auf die Auslegung eines Thermoplast-Behälters berücksichtigen zu können, hat man den Faktor chemische Resistenz f_{CR} eingeführt. Bei der Behälterauslegung wird der chemische Abminderungsfaktor A_{21} (Abminderung Stabilität und Verformung) bzw. A_{2B} (Abminderung Spannung) berücksichtigt. Der A_2 -Faktor stellt dabei den Kehrwert des Faktors der chemischen Resistenz f_{CR} dar: $A_2 = 1/f_{CR}$.

Dieser Faktor gibt die Auswirkung einer Chemikalie auf den Thermoplasten im Verhältnis zu Wasser an. Der Faktor ist immer ≥ 1 . Ist der Faktor 1, bedeutet dies, dass die Chemikalie auf den Thermoplast so wirkt wie Wasser. Bestimmt wird er nach der DIN 16889.

In der veröffentlichten Liste der chemischen Widerstandsfähigkeit der SIMONA® Werkstoffe sind in der Regel einzelne Chemikalien aufgeführt. In der Praxis werden in den überwiegenden Fällen Mischungen von verschiedenen Chemikalien eingesetzt, die nicht in dieser Liste aufgeführt sind. In diesen Fällen bitten wir Sie, sich für eine Materialempfehlung mit unserem Technical Service Center in Verbindung zu setzen.

7 Sonstige Eigenschaften

7.1 Physiologische Unbedenklichkeit

7.1.1 Kontakt mit Lebensmitteln nach Europäischen Richtlinien

In Europa gibt es strenge gesetzliche Regelungen für Materialien, die dazu bestimmt sind, mit Lebensmitteln in Kontakt zu kommen. Für alle im Lebensmittelkontakt eingesetzten Materialien (nicht nur Kunststoffe) gibt es zunächst einmal eine sogenannte Rahmenverordnung. Aktuell ist das die am 27. Oktober 2004 vom Europäischen Parlament und dem Rat der EU verabschiedete Verordnung (EG) Nr. 1935/2004.

Prinzipiell gilt für alle Materialien, die mit Lebensmitteln in Kontakt kommen, dass aus ihnen nach Möglichkeit keine Stoffe auf die Nahrungsmittel übergehen dürfen. Ist dies dennoch der Fall, ist in Artikel 3 der EU-Verordnung 1935/2004 die Menge der migrierenden Bestandteile wie folgt festgelegt:

- es darf zu keiner Gefährdung der menschlichen Gesundheit kommen,
- es darf zu keiner unvermeidbaren Veränderung der Zusammensetzung der Lebensmittel kommen und
- es darf zu keiner Beeinträchtigung der geschmacklichen und geruchlichen Eigenschaften des Lebensmittels kommen.

In der Verordnung (EU) 10/2011 (früher 2002/72/EG) gibt es eine sogenannte Positivliste, in der alle zugelassenen Materialien/Additive gelistet sind. Diese neue EU-Verordnung 10/2011 ist seit dem 1. Mai 2011 gültig und Bestandteil der EU-Verordnung 1935/2004.

Die europäische Behörde für Lebensmittelsicherheit (EFSA) ist die Institution für die Bewertung von Anträgen zur Aufnahme neuer Stoffe in die Positivliste der Verordnung (EU) 10/2011. Es wird vor allem eine gesundheitliche Beurteilung von Substanzen, die aus Materialien auf Lebensmittel übergehen, durchgeführt.

Generell gilt: Je mehr von einer Substanz auf Lebensmittel übergeht, desto größer ist der Umfang der Daten, die für eine Bewertung vorgelegt werden müssen, und desto schwieriger wird die Lebensmittelizulassung.

Die wichtigsten Inhalte der Verordnung (EU) 10/2011 sind:

- eine Positivliste für die Ausgangsstoffe (Monomere) und eine Substanzliste für die Hilfsstoffe (Additive), die zur Herstellung von Kunststoffen verwendet werden dürfen
- Migrationsverfahren basierend auf Grenzwerten und Reinheitsspezifikationen
- Herstellung nach EU 2023/2006 (GMP = Good-Manufacturing-Process)
- Chargen-Rückverfolgung und die daraus resultierende Konformitätserklärung mit der Bestätigung der oben genannten Anforderungen

Die von SIMONA nach oben genannten Kriterien hergestellten, von unabhängigen Instituten auf Migration geprüften und nachfolgend genannten Werkstoffe sind grundsätzlich für den Kontakt mit Lebensmitteln geeignet:

- PE-HD (natur, schwarz)
- PE 100 (natur, schwarz)
- PE 500 (natur, schwarz, grün, dunkelblau, hellblau, rot, gelb, rotbraun, grau)
- PE 1000 (natur, schwarz, grün, dunkelblau)
- PP-H natur, PP-H AlphaPlus®
- PP weiß 9002
- PVDF
- PVC-LZ
- SIMOPOR-LZ

Untersuchungen von SIMONA® ECTFE am Fresenius-Institut in Taunusstein haben ergeben, dass ECTFE den Empfehlungen der Kunststoffkommission des BgVV entspricht. Eine BgVV- oder FDA-Zulassung wurde bisher jedoch nicht beantragt.

Dagegen sind elektrisch leitfähige Werkstoffe oder mittels halogenhaltiger Flammschutzmittel schwerentflammbar eingestellte Werkstoffe nicht für den Kontakt mit Lebensmitteln zugelassen.

Weitere Informationen bezüglich Lebensmittelzulassungen sind auf der Homepage des BfR (Bundesinstitut für Risikobewertung) unter www.bfr.bund.de und der Homepage der EFSA (Europäische Behörde für Lebensmittelsicherheit) unter www.efsa.europa.eu/de zu finden.

7.1.2 Kontakt mit Trinkwasser

Die europäische Trinkwasserrichtlinie stellt den höchsten internationalen Standard dar. Die Trinkwasser-Richtlinie der Europäischen Union (EU Richtlinie 98/83/CE) legt fest, dass Trinkwasser für den menschlichen Gebrauch frei von Krankheitserregern und Keimen und hinsichtlich Geschmack, Geruch und Aussehen („rein und klar“) einwandfrei sein muss.

Die Qualität des Trinkwassers in Deutschland wird durch die Trinkwasserverordnung TrinkwV 2001 (mit Änderungen aus 2012) geregelt. In ihr sind alle Anforderungen an kurz oder langfristige Installationen enthalten. Sie stellt die Umsetzung der EG-Richtlinie 83/98 (CELEX Nr: 398L0083) in nationales Recht dar.

Zur hygienischen Bewertung organischer Materialien im Kontakt mit Trinkwasser gibt das Umweltbundesamt (UBA) Leitlinien in Form verschiedener Empfehlungen heraus.

Die Leitlinien des Umweltbundesamtes zur hygienischen Beurteilung von organischen Materialien im Kontakt mit Trinkwasser wurden erstmals als KTW-Empfehlungen im Jahr 1977 veröffentlicht. Inzwischen sind die KTW-Empfehlungen durch verschiedene neue Leitlinien des UBA ersetzt. Die Prüfungen unterteilen sich in eine Prüfung nach KTW-Empfehlung bzw. KTW-Prüfleitlinie und eine Prüfung nach dem DVGW-Arbeitsblatt W 270.

Bei der Prüfung gemäß KTW handelt es sich um eine Prüfung am Endprodukt. Das in drei Intervalle unterteilte, einheitliche Verfahren wird nach praxisnaher Vorbehandlung (u.a. Vorwässern und Spülen) direkt am Produkt durchgeführt. Die Gesamtdauer des Prüfverfahrens

rens beträgt 10 Tage. Im Wesentlichen werden hierbei die Parameter

- äußere Beschaffenheit (u.a. Klarheit, Färbung, Geruch, Geschmack),
- Abgabe von organisch gebundenen Kohlenstoffen (TOC) und
- Chlorzehrung

überprüft.

Bei der Prüfung nach dem DVGW-Arbeitsblatt W 270 handelt es sich um eine reine Materialprüfung. Der zu prüfende Gegenstand wird über die gesamte Prüfdauer in einem permanent vom Prüfwasser durchströmten Becken eingelagert. Die Gesamtdauer der Prüfung beträgt 6 Monate. Nach 3 bzw. 6 Monaten wird der Prüfkörper entnommen und auf sein mikrobiologisches Langzeitverhalten (u.a. Bewuchsbildung) untersucht.

Eine KTW und DVGW-W 270 Untersuchung haben wir für folgende SIMONA® Materialien durchgeführt:

- PE 100
- PP-H AlphaPlus®
- PP-C lichtgrau
- PVC-DS-TW
- SIMOLUX

Weitere Informationen sind auf der Webseite des Umweltbundesamtes unter www.umweltbundesamt.de, speziell die Leitlinie unter www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/374/dokumente/ktw_leitlinie_070316.pdf, und der Webseite des DVGW (Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V.) unter www.dvgw.de/465.html, zu finden.

7.2 Strahlenbeständigkeit

Die Wirkung energiereicher Strahlen auf Kunststoffe ist nicht von der Strahlenart, sondern ausschließlich von der Höhe der Strahlendosis abhängig (Ausnahme: bei sehr schweren Teilchen wie α -Teilchen, Protonen, etc.). Durch Bestrahlung in Umgebungsatmosphäre ergeben sich wesentlich kürzere Standzeiten als unter Ausschluss des Luftsauerstoffes. Die für die Standzeit ausschlaggebenden Dosiswerte können Tabelle 9 entnommen werden.

Werkstoff	Höchstzulässige Dosis Mrad *	Dosis bei Langzeitbeanspruchung Mrad *
PE-HD	10	1
PP	3	0,1
PVC	60	6
PVDF	40	20
E - CTFE	200	50

Tabelle 9: Strahlenbeständigkeit

* 10^4 J/kg = 1 Mrad

Da die für den Menschen tödliche Strahlendosis ca. 0,0006 Mrad beträgt, können überall dort, wo sich der Mensch ungefährdet aufhält, selbstverständlich alle bekannten Kunststoffe eingesetzt werden.



8 Langzeiteigenschaften

8.1 Prüfverfahren

Vergleicht man die mechanischen Eigenschaften unterschiedlicher Thermoplaste, so beziehen sich diese Vergleiche auf die Kurzzeiteigenschaften (z.B. Zähigkeit, Festigkeit). Thermoplaste neigen jedoch bei einer mechanischen Belastung zum Kriechen. Ihre mechanischen Eigenschaften sind somit zeitabhängig.

Daher werden bei der Konstruktion eines Bauteiles die Kriecheigenschaften berücksichtigt, indem die Kenndaten aus Zeitstanduntersuchungen eingesetzt werden. Hierbei handelt es sich um den sogenannten **Kriechmodul** und die **Zeitstandfestigkeit**. Bei den Sicherheitsfaktoren wird zudem der **Langzeitschweißfaktor** berücksichtigt.

Zur Messung der Langzeiteigenschaften stehen unterschiedliche Messmethoden zur Verfügung.

8.1.1 Zeitstandzugversuch

Im Zeitstandzugversuch wird eine Probe mit definierten Abmessungen dauerhaft unter Zug belastet. Dabei ist darauf zu achten, dass die Bedingungen wie Temperatur, Kraft und Medium konstant gehalten werden.

Die Zeit bis zum Versagen unter definierter Last wird als Kenngröße festgehalten. Unterschiedliche Belastungen führen dann zu einer Kurvenschar, die den Werkstoff hinsichtlich dieser Belastung charakterisiert. Vergleicht man geschweißte und ungeschweißte Proben, so ergibt sich aus dem Quotienten der Langzeitschweißfaktor. Um die Prüfzeiten zu minimieren, werden auch spannungsrissfördernde Medien anstatt Wasser verwendet. Kerbempfindliche Werkstoffe wie PE 63 und PE 80 reagieren sehr

empfindlich auf derartige Medien.

Mittels eines Zeitstandzugversuchs wird auch der Kriechmodul gemessen. Mit zunehmender Zeit verändert sich die Steigung der Spannungs-Dehnungs-Kurve zu geringeren Werten. Die Kriechmoduln unterschiedlicher Thermoplaste können der Richtlinie DVS 2205-1 entnommen werden.

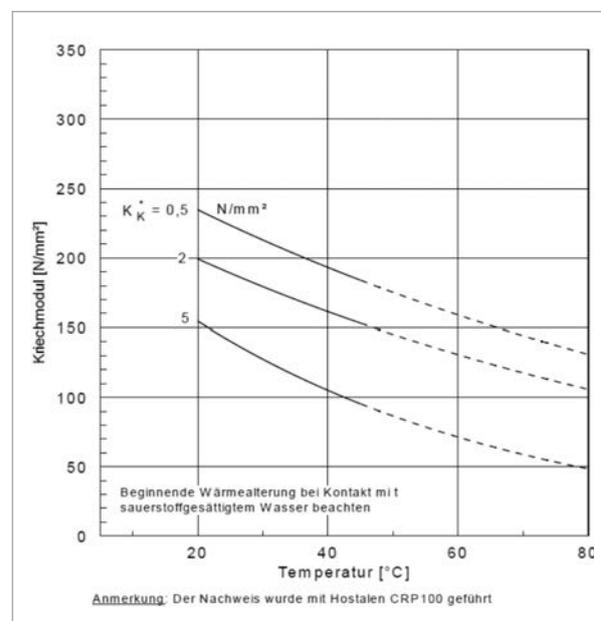


Abbildung 48: Kriechmodul von PE 100 für 25 Jahre

8.1.2 Zeitstandinnendruckversuch

Zur Charakterisierung von Rohren wird der Zeitstandinnendruckversuch verwendet. Dabei werden Rohre oder Rohrleitungsteile mit Wasserfüllung unter Innendruck belastet. Durch die Variation von Druck und Temperatur erhält man eine Kurvenschar, anhand welcher die Druckbelastbarkeit eines Werkstoffes abgelesen werden kann (siehe DVS 2205-1). Aus diesem Versuch leiten sich auch die Bezeichnungen für die PE-Typen ab. PE 100 bedeutet zum Beispiel, dass nach einer Belastung von

50 Jahren mit Wasser bei 20 °C eine Mindestfestigkeit des Werkstoffes von 10 MPa zu erwarten ist.

Vergleicht man geschweißte Rohrleitungen mit unverschweißten des gleichen Typs, so kann hiermit die Langzeitfestigkeit der Verbindungstechnik überprüft und der Langzeitschweißfaktor bestimmt werden.

8.1.3 Full-Notch-Creep-Test (FNCT)

Das Versagen von Probekörpern oder Bauteilen erfolgt immer an mehr oder weniger ausgeprägten Fehlern oder Inhomogenitäten des Werkstoffes. Da diese Fehler bei sehr homogenen Werkstoffen wie den Thermoplasten sehr gering sind, verlängern sich in der Regel die Prüfzeiten. Im Zeitstandversuch werden bei Temperaturen bis 40 °C in der Regel bis zu 10.000 Stunden durchgeführt. Dies entspricht etwa einer Betriebszeit von mehr als einem Jahr bei einem 24h-Betrieb.

Untersuchungen haben gezeigt, dass eine Charakterisierung des Werkstoffes auch durch die Bruchmechanik erfolgen kann. Dabei geht man von einer gekerbten Probe aus, die dann unter Zugbelastung wesentlich schneller versagt, als eine ungekerbte Probe. Beim FNCT geht man von einer rechteckigen Probe mit einer scharfen umlaufenden Kerbe aus, die in einer Tensidlösung unter Zug belastet wird. Um die Prüfzeit bei PE Werkstoffen weiter zu verkürzen, erfolgt der Test bei 80 °C unter einer Last von 4 MPa. Die Mindestanforderung (nach DVS 2205-1, BB1) für die Standzeit beträgt z.B. bei PE 80 100 Stunden, bei PE 100 300 Stunden und bei PE 100 RC sogar 8.760 Stunden.

Weitere Informationen zur FNCT-Prüfung finden Sie in der DVS 2203-4 Beiblatt 2.

In Zukunft sollen weitere Prüfvarianten, je nach Probekörperdicke, in die DVS übernommen werden. Hierzu zählt z.B. der 2-Notch Creep Test (2NCT) (DVS 2203-4 Beiblatt 4).

8.1.4 Zeitstandkurven

Zeitstandkurven stellen Bruchkurven dar, deren Lage neben dem Werkstoff ganz erheblich von der mechanischen Belastung und der Temperatur abhängt.

Zeitstandversuche erfolgen im Allgemeinen mit fünf Probekörpern, die einer konstant bleibenden Belastung und Temperatur ausgesetzt werden. Die Zeit bis zum Versagen des Probekörpers (Bruch) wird als Standzeit registriert, aus allen ermittelten Standzeiten der Mittelwert gebildet und in das (doppelt logarithmische) Zeitstanddiagramm eingetragen. Dieses Verfahren wird für unterschiedliche Belastungen bei immer gleicher Temperatur durchgeführt. Später ergeben sich aus diesen gemittelten Standzeiten mit einer Summenhäufigkeit von 97,5 % die Mindeststandzeiten und durch lineare Regression dann die Mindestzeitstandkurve.

Viele Zeitstandkurven sind für Standzeiten $>10^4$ h gestrichelt dargestellt, weil für diese Zeiten keine Versuchsergebnisse vorliegen. Im Gegensatz dazu verfügt man über eine Zeitstanderfahrung von mehr als 25 Jahren bei PE-HD, PP-H, PVC-U und PVDF. Zeitstandkurven für Rohre der genannten Standardwerkstoffe sind in der DVS 2205-1 abgedruckt. Früher ist der gestrichelte Verlauf durch Extrapolation/Interpolation (für bestimmte Temperaturen) nach dem Gesetz von Arrhenius entstanden. Bei dem Verfahren geht man davon aus, dass durch die Experimente bei erhöhter Temperatur auf das Verhalten bei niedriger geschlossen werden kann. Inzwischen sind

bei den meisten Materialien nur noch durchgezogene Linien zu finden.

Materialalterung, die sich durch Werkstoffversprödung auswirkt, schränkt die Möglichkeit, Zeitstandkurven zu extrapolieren, ein. Ein heranzuziehendes Kriterium für Alterung ist z.B. die Abnahme der Reißdehnung um einen bestimmten Prozentsatz. Da jedoch werkstoffspezifische Grenzwerte bislang noch nicht festgelegt worden sind, wird auf die Angabe der Altersgrenzlinie in den Zeitstanddiagrammen verzichtet. Nachfolgend ist eine PE 100 Zeitstandkurve zu sehen.

Wie wird mit Zeitstandkurven gearbeitet?

Mit Hilfe der Zeitstandkurve (siehe Abbildung 49) kann bei vorgegebener Lebensdauer t_1 und Betriebstemperatur T eines Bauteiles die Belastungshöhe grundsätzlich ermittelt werden (Bruchkurve Wasser: $K = 5 \text{ N/mm}^2$).

Die ermittelten Spannungswerte berücksichtigen jedoch nicht die tatsächlichen Belastungen in der Praxis, hervorgerufen durch mehr oder weniger aggressive Medien sowie Schweißverfahren. Diese müssen gesondert ermittelt werden (s.a. DVS 2205-1, DIBt-Medienliste). Jene Betriebsbedingungen spiegeln sich in einer imaginären

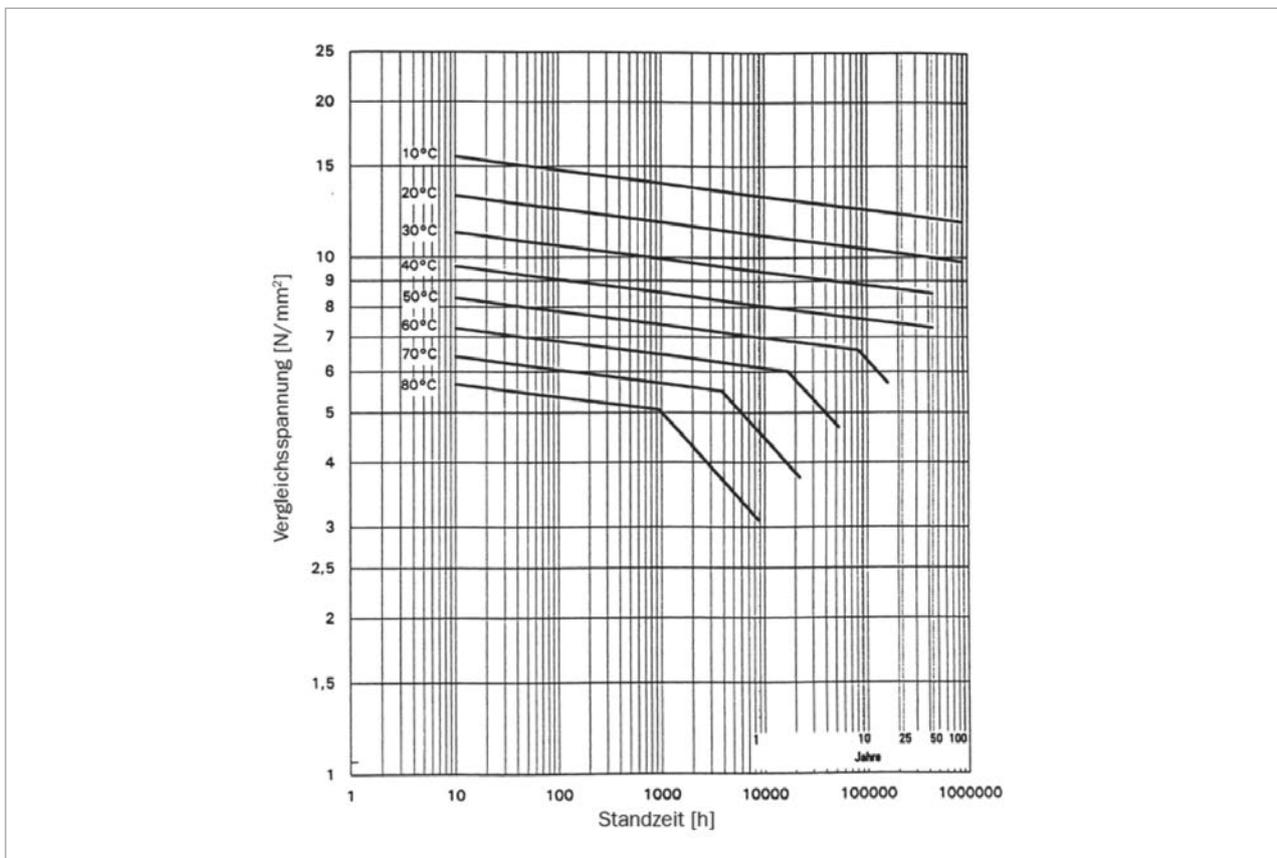


Abbildung 49: Zeitstandkurve PE 100

Kurve (siehe Abbildung 50) wieder. Im gezeigten Beispiel ist der Spannungswert $\sigma_A = 3 \text{ N/mm}^2$.

Gleichzeitig lässt sich aus einem Zeitstanddiagramm die tatsächliche Lebensdauer t_2 eines Bauteiles ermitteln. Hier im Beispiel ist die maximale Betriebsbelastung $\sigma_{zul} = 1,5 \text{ N/mm}^2$.

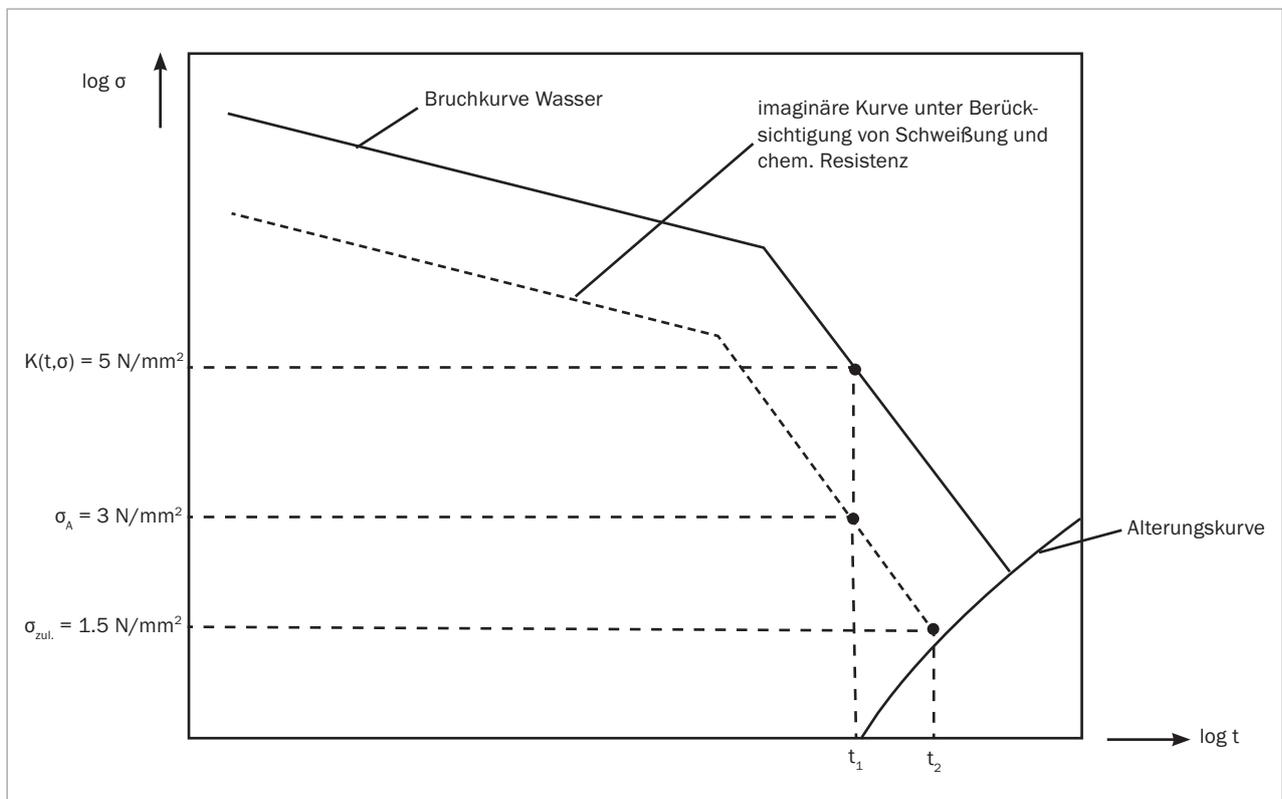


Abbildung 50: Arbeiten mit der Zeitstandkurve

8.1.5 Isochrone Spannungs-Dehnungs-Diagramme

Isochrone Spannungs-Dehnungs-Diagramme gehören zu den aussagekräftigsten Diagrammen. Mit ihnen lassen sich zeitabhängige Spannungs- und Verformungsänderungen (auf den Linien gleicher Einsatzdauer = Isochrone) für den Retardations- und Relaxationsfall ermitteln. Auch der Kriechmodul als Funktion von Zeit und Spannung kann einfach errechnet werden. Für Bauteile, die einer konstanten Belastung ausgesetzt sind, ergeben sich aus dem Schnittpunkt mit Isochronen (Zeit, Temperaturabhängigkeit; siehe Beispiel PE 100-Kurven) und Spannung die zeitabhängigen Dehnwerte. Dabei sollten jedoch nur die zulässigen Dehnwerte berücksichtigt werden. Beim Relaxationsfall, also bei konstanter Deformation, nehmen die Spannungen im Werkstoff zeitabhängig ab.

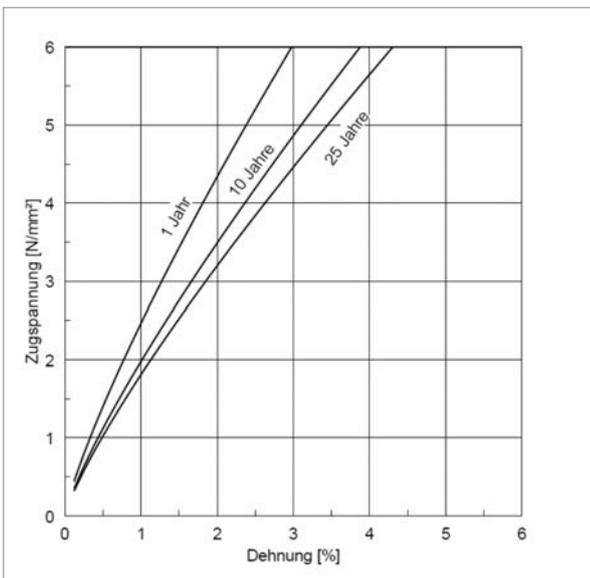


Abbildung 51: Isochrone-Spannungs-Dehnungs-Diagramm von PE 100 für 23 °C

Was bedeutet das für die Praxis?

Da Thermoplaste beim Langzeiteinsatz sowohl Spannungen abbauen als auch zu mehr oder weniger ausgeprägtem Kriechen neigen, lassen sich mit Hilfe der isochronen Spannungs-Dehnungsschaubilder die o.a. Verhaltensweisen bei Einsatzbeginn eines Werkstoffes im Voraus abschätzen.

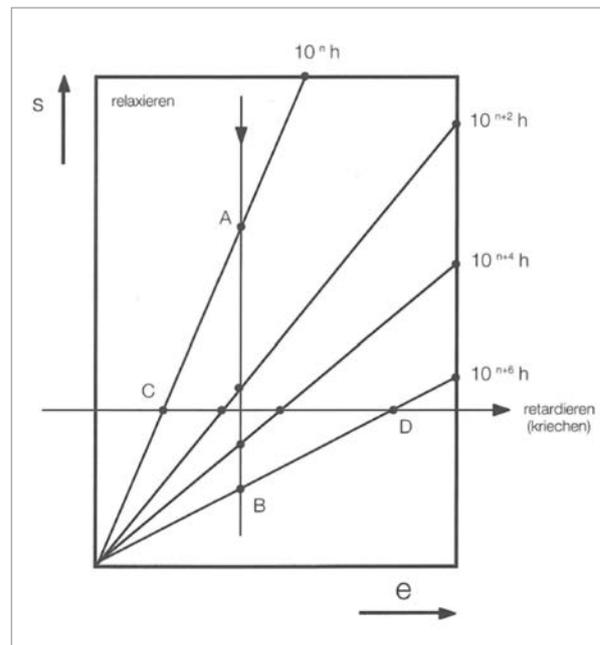


Abbildung 52: Relaxations- und Retardationsschnitte im isochronen Spannungs-Dehnungsschaubild in schematischer Darstellung

Auf der vertikalen Relaxationsgeraden kann abgelesen werden, wie lange es dauert, ein bestimmtes Maß an Spannung abzubauen, die durch äußere Belastungen in den Werkstoff gebracht wurde. Der Punkt A im Diagramm zeigt bei 10^n Stunden einen bestimmten Spannungswert im Werkstoff, der sich bei 10^{n+6} Stunden im Punkt B deutlich reduziert hat.

Andererseits ist es möglich, mit Hilfe der waagerechten Retardationsgeraden bei konstant anliegender äußerer Belastung zu ermitteln, um welchen Betrag sich ein Thermoplast bei unterschiedlichen Einsatzzeiten dehnt (kriecht). Im Punkt C weist der Werkstoff bei 10^n Stunden eine geringere Dehnung auf als in Punkt D bei längeren Einsatzzeiten (10^{n+6} Stunden).

8.2 Statische Berechnungen

Unsere technischen Service-Abteilungen (das Technical Service Center sowie die Anwendungstechnik der Division Rohre und Formteile) erstellen auf Wunsch statische Berechnungen für Behälter entsprechend den Richtlinien des Deutschen Verbands für Schweißen und verwandte Verfahren e.V. (DVS) 2205-1, 2 und 5 sowie entsprechende statische Nachweise für Rohre nach den Richtlinien der Abwassertechnischen Vereinigung ATV A 127, ATV M 127 und der DVS 2210. Diese Statiken für thermoplastische Bauteile werden von unabhängigen Prüfstellen als prüffähig anerkannt.

Bei der Auslegung von Bauteilen und Behältern aus thermoplastischen Kunststoffen spielt deren zeit- und temperaturabhängiges Eigenschaftsprofil eine entscheidende Rolle. Grundsätzlich erfolgt die Berechnung auf der Basis von Langzeitwerten. In Abhängigkeit von der Belastungsart sind im Allgemeinen drei Kriterien zu berücksichtigen:

1. Maximal zulässige Spannung:

Die Berechnung erfolgt unter der Bezugnahme auf die Zeitstandfestigkeit $K(t, T)$ des verwendeten Werkstoffes (siehe Beiblätter der DVS 2205-1). Diese stellt die Langzeitfestigkeit von thermoplastischen Werkstoffen als Funktion der Zeit t und der Temperatur T unter Einwirkung des Mediums Wasser dar. Aus den

gefundenen Zeitstandwerten wird abhängig von den chemischen Einflüssen der Füllmedien die maximal zulässige Spannung eines Bauteiles ermittelt.

2. Verformung (z.B. Dehnung):

Der charakteristische Kennwert ist der sogenannte Kriechmodul E_c . Dabei handelt es sich um den Quotienten aus Spannung und Gesamtdehnung. Der Kriechmodul ist zeit- und temperaturabhängig und kann mittels sogenannter Kriechkurvendiagramme (siehe Beiblätter der DVS 2205-1) ermittelt werden.

3. Steifigkeit

Bei sehr großflächigen Bauteilen ist die Steifigkeit der verwendeten Kunststoffe der entscheidende Faktor für die Ermittlung der erforderlichen Wanddicken. Wird die Durchbiegung der Behälterwand mit den nach 1. bzw. 2. berechneten Wanddicken zu groß, so muss ein Großteil der äußeren Belastung durch Membrankräfte, d.h. Zugkräfte, aufgefangen werden. In solchen Fällen ist eine Erhöhung der Wanddicke erforderlich. Dies führt zu einer Erhöhung der Plattensteifigkeit und zu einer Minimierung der auftretenden Spannungen.

Auch bei der Auslegung von Rohren erfolgt ein Stabilitätsnachweis zur Ermittlung des Sicherheitsabstandes zwischen kritischer Last und tatsächlich vorhandener Belastung. Dies geschieht unter Berücksichtigung der Einflüsse von vertikaler Gesamtlast (Erd- und Verkehrslast), äußerem Wasserdruck (Grundwasser) sowie Überlagerung von vertikaler Gesamtlast und äußerem Wasserdruck.

Um die Abwicklung dieser besonderen Serviceleistung unserer anwendungstechnischen Abteilung zu erleichtern, stellen wir Ihnen gerne Fragebögen zur statischen

Auslegung von Behältern, Schächten und Rohrleitungen zum Download auf unserer Homepage zur Verfügung (www.simona.de/download). Fragen zu den Einsatzmöglichkeiten der unterschiedlichen SIMONA® Kunststoffe werden Ihnen unsere Mitarbeiter gerne im Vorfeld beantworten.

8.3 Werkstoffe im prüfzeichenpflichtigen

Behälterbau

Nach § 62 und § 63 (seit 2010) des deutschen Wasserhaushaltsgesetzes (WHG) unterliegen Anlagen bzw. Anlagenteile zum Lagern, Abfüllen bzw. Umschlagen von boden- und wassergefährdenden Flüssigkeiten bestimmten Herstellungs- bzw. Überwachungsregeln. Diese sind u.a. in den Bau- und Prüfgrundsätzen (BPG) des Deutschen Instituts für Bautechnik (DIBt), Berlin, festgehalten. Insbesondere Anlagen bzw. Behälter aus thermoplastischen Kunststoffen dürfen entsprechend der BPG nur aus Halbzeugen gefertigt werden, deren Rohstoffe vom DIBt zugelassen sind.

Entsprechend den Bau- und Prüfgrundsätzen unterliegen SIMONA® Halbzeuge strengen Kriterien der Werkstoffauswahl und -verarbeitung. Nur laufend überwachte Grundstoffe gelangen in den Verarbeitungsprozess, der ebenfalls einer kontinuierlichen Überwachung unterworfen ist. Als Grundlage der Überwachung dient die DIN EN ISO 9001. Weiterhin unterliegen SIMONA® Produkte der Fremdüberwachung durch das Süddeutsche Kunststoffzentrum (SKZ) in Würzburg, den Technischen Überwachungsverein TÜV Süddeutschland sowie den Kunststoffrohrverband KRV (bis 2003 der GKR Bonn). Dies gewährleistet die gewohnt hohe Qualität der von der SIMONA AG produzierten Produkte.

9 Kunststoffphysik

9.1 Spannungsarten

Alle Kunststoffhalbzeuge und alle aus ihnen gefertigten Bauteile besitzen ein Eigenspannungspotential, das nicht auf das Einwirken äußerer Kräfte zurückzuführen ist. Es handelt sich dabei um innere Spannungen, die durch den Herstellprozess hervorgerufen werden.

Die im Extruder plastifizierte Kunststoffschmelze wird durch einen Spalt des Breitschlitzwerkzeugs in den Walzenspalt des Glättwerks hineinextrudiert. Die bereits leicht abgekühlte Schmelze wird darin unterhalb der Schmelztemperatur abgekühlt, damit die vom Werkzeug vorgegebene Form erhalten bleibt. Durch die Kühlung des Extrudats von außen entsteht ein Temperaturgradient zwischen der Außenschicht und dem Innern des Halbzeugs. Die innere Schicht des Halbzeugs wird nun ebenfalls langsam abkühlen und die Wärme nach außen abgeben. Durch die bereits erstarrte Außenhülle wird das Volumen konstant gehalten. Die Innenschicht versucht jedoch aufgrund der hohen thermischen Dehnung zu schrumpfen, was durch die starre Außenschicht behindert wird. Durch diesen Prozess verbleiben im Halbzeug innere Spannungen (**Abkühlspannungen**), die bei der Verarbeitung beobachtet werden können. Eine Platte mit hohen Eigenspannungen verbiegt sich beispielsweise während der Erwärmung. Bei dickwandigen Rohren kann man die Höhe der Eigenspannungen auch daran erkennen, dass die Rohrenden einen geringeren Radius als die Rohrmitte besitzen.

Ein zweiter Grund für die inneren Spannungen liegt in der Verstreckung der Moleküle während der Extrusion (**Orientierungsspannungen**). Dieser Anteil ist aber im Vergleich zu den Abkühlspannungen in der Regel als gering einzustufen.

Im Allgemeinen gilt, dass **Druckeigenspannungen** vorwiegend dort auftreten, wo eine höhere Abkühlgeschwindigkeit vorliegt. **Zugeigenspannungen** treten vorwiegend dort auf, wo eine niedrigere Abkühlgeschwindigkeit vorliegt.

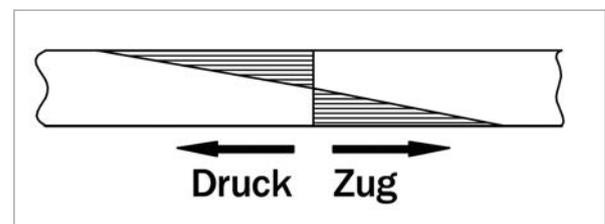


Abbildung 53: Spannungsorientierungen

Beim Spritzgießen treten zudem **Nachdruckeigenspannungen** auf, die durch zu hohen Druck auf das Formteil während des Abkühlens entstehen können. Dies kann oftmals durch geeignete Entlüftungsöffnungen vermieden werden. Treten überhöhte Eigenspannungen in einem Spritzgussteil auf, so zeigt sich dies entweder in einer erhöhten Schwindung oder an einer Gestaltänderung während der Warmlagerung.

Bei der Abkühlung von teilkristallinen Thermoplasten (Abkühlung von der Schmelze her in den thermoplastischen Bereich hinein) kristallisiert der Werkstoff aus. Dabei findet eine Volumenkontraktion statt. Bei ungleichmäßiger Abkühlung erfolgt ein zeitlich unterschiedlicher Kristallisationsablauf mit einer Verspannung der Gefüge­teile (**Kristallisationseigenspannungen**).

Einbettungseigenspannungen höherer Art sind ausschließlich im mikroskopischen (sehr kleinen) Bereich des Werkstoffes oder im submikroskopischen Bereich, d.h. im Bereich der Atome und Moleküle, zu finden.

- **Eigenspannungen im mikroskopischen Bereich**
= Spannungen in der Umgebung von Füllstoffpartikeln oder Farbpigmenten
- **Eigenspannungen im submikroskopischen Bereich**
= Spannungen an den Grenzen der kristallinen Bereiche bei Sphärolitbildung (diese Art von Eigenspannungen ist z.B. bei dem Werkstoff Polypropylen von Bedeutung)

Von allen bisher genannten Arten kommt den Abkühl-
eigenspannungen besondere Bedeutung zu. Die Höhe des

beim Ur- oder Umformen entstehenden Eigenspannungs-
potentials nimmt zu mit

- steigender Abkühlgeschwindigkeit
- steigender Differenz des spezifischen Volumens
(bzw. Dichte), die während des Prozesses auftritt

In Abbildung 54 ist schematisch das spezifische Volumen
in Abhängigkeit der Temperatur für amorphe und teilkristalline
Thermoplaste aufgezeigt.

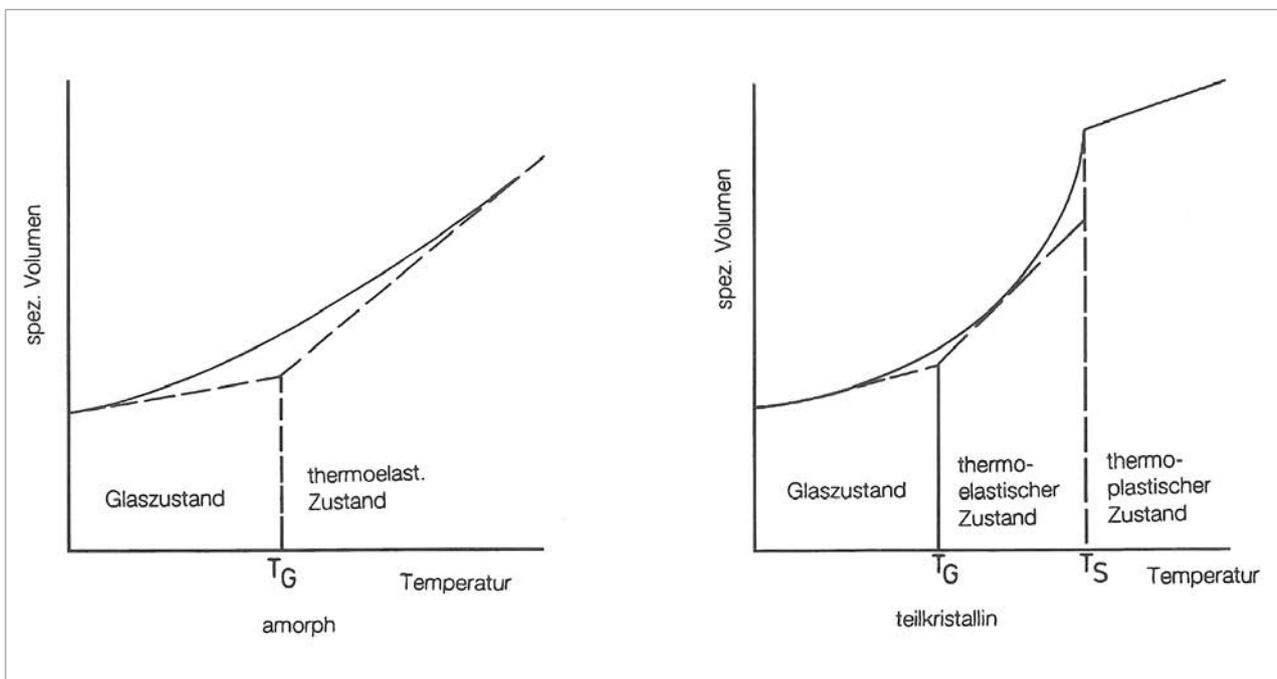


Abbildung 54: Abhängigkeit des spezifischen Volumens von der Temperatur; links: amorphe Thermoplaste; rechts: teilkristalline Thermoplaste

9.2 Verminderung der Eigenspannungen

Vor allem teilkristalline Thermoplaste besitzen stark unterschiedliche spezifische Volumina zwischen Schmelz- und Raumtemperatur. Um das daraus resultierende Eigenspannungsniveau so gering wie möglich zu halten, sollte die Umformtemperatur nur knapp oberhalb des Kristallitschmelzbereiches liegen. Oft lässt die Ur- bzw. Umformtechnik keine gezielte Beeinflussung der eigenspannungsbildenden Parameter zu. Abhilfe bietet hier die Möglichkeit einer nachträglichen Wärmebehandlung mittels Tempern. Um hierbei den größtmöglichen Erfolg zu erzielen, sollten eine Reihe von Einflussgrößen beachtet werden, da die Wärmebehandlungstemperatur werkstoffabhängig gewählt werden muss.

- Amorpher Werkstoff: Tempern nahe der Glasübergangstemperatur
- Teilkristalliner Werkstoff: Tempern ca. 10 bis 20 K unterhalb der Kristallitschmelztemperatur

Bei Werkstoffen mit hohem Orientierungszustand muss die Wärmebehandlungstemperatur geringer angesetzt werden. Bei hohen Temperaturen entstehen eventuelle Rückstellkräfte, die zu geringen Verformungen führen können. Die Temperdauer wird durch die Dicke des zu tempernden Körpers und die Lage des Spannungsprofils im Wandquerschnitt bestimmt.

Die Wärmebehandlung sollte in eine Aufwärm-, eine Halte- und eine Abkühlphase unterteilt werden. Die Aufwärmung kann relativ rasch erfolgen, wenn an der Oberfläche Druckspannungen vorhanden sind. Hier genügt eine Aufheizgeschwindigkeit von 20 K/(Min · Wanddicke in mm). Die Haltezeit ist von der Dicke des Halbzeugs und dem Druck der Umgebungsluft abhängig. Bei Normaldruck sollte die Zeit der maximalen Temperatur etwa

20 Min/mm betragen. Anschließend erfolgt die Abkühlung, die sehr sorgfältig und langsam durchgeführt werden soll. Empfehlenswert ist eine Abkühlrate von 5 K/(min · Wanddicke in mm). Beim Abkühlen muss jedoch nicht in jedem Fall bis auf Raumtemperatur abgekühlt werden. In der Regel kann das Halbzeug bereits bei einer Temperatur von 40 °C aus dem Ofen entnommen werden.

Im Allgemeinen gilt: Je höher die Temperatur, desto geringer sollte die Abkühlgeschwindigkeit sein.

Tempern von Kunststoffteilen ist generell nur dann sinnvoll, wenn eine Formänderung infolge Wärmedehnung unbehindert erfolgen kann. Ist dies nicht der Fall (z.B. Kunststoffplatte in Metallrahmen fest eingespannt), so stellen sich dort Wärmespannungen ein. Der Zeitpunkt für den Tempervorgang ist deshalb innerhalb eines Fertigungsablaufes sorgfältig auszuwählen.

Vollstäbe aus thermoplastischen Polymeren sind meist mit einem hohen Eigenspannungspotential behaftet. Bei der spanenden Bearbeitung sollten zuerst nur Rohlinge gefertigt werden, da sich eigenspannungsbedingte Deformationen einstellen und nach dem Tempervorgang weiter verändern.

Liegt der Rohling in nahezu spannungsfreiem Zustand vor, wird durch sachgemäß ausgeführte Arbeitsgänge (um weitere Verformungen zu vermeiden) auf Endmaß gefertigt. Der spannungsarme Zustand des Bauteiles erlaubt relativ enge Fertigungstoleranzen.

Beim Tempern von Rohren muss die Wärme möglichst innen und außen zu- bzw. abgeführt werden können. Da vor allem Rohre aus PP-Homopolymerisat mit einem

hohen Potential an Eigenspannungen behaftet sind, werden alle SIMONA® PP Rohre spannungsarm in einem Inline-Prozess getempert. Durch diese Wärmebehandlung kann die Belastbarkeit erheblich gesteigert werden.

Auch beim Tiefziehen können Abkühleigenspannungen eingefroren werden, die dann die Verarbeitungs- und Nachschwindung beeinflussen. Günstig sind hierbei hohe Werkzeugtemperaturen und geringe Abkühlgeschwindigkeiten.

9.3 Wärmespannungen

Wird die thermische Dehnung (Dilatation) eines Körpers durch äußere Zwänge behindert, so entstehen Wärmespannungen.

Die Größe der jeweiligen Wärmespannungen lässt sich mit folgender Gleichung leicht abschätzen:

$$\sigma_w = \pm E \cdot \alpha \cdot \Delta T$$

σ_w = Wärmespannung

E = Elastizitätsmodul

α = mittlere thermische Ausdehnungskoeffizient

ΔT = Temperaturdifferenz

Die Gleichung zeigt, dass sich Spannung und Temperaturdifferenz zueinander proportional verhalten. Die Praxis hat jedoch gezeigt, dass z.B. die beim Aufheizen eines Körpers entstehenden Druckwärmespannungen geringer sind als die zuvor überschlägig errechneten. Dabei nehmen die Abweichungen zwischen tatsächlicher und errechneter Wärmespannung mit steigender Temperatur zu. Ursache dafür ist eine Abhängigkeit des E-Moduls und des linearen Ausdehnungskoeffizienten

von der Temperatur. Während der E-Modul mit steigender Temperatur abfällt, nimmt der lineare Ausdehnungskoeffizient zu. Da sich diese gegenläufigen Tendenzen im Allgemeinen jedoch nicht kompensieren, kann das Produkt aus E-Modul und Ausdehnungskoeffizient nicht als Konstante betrachtet werden. Außerdem werden bei der obigen Abschätzung Relaxationsprozesse nicht berücksichtigt. Erfolgt der Temperaturanstieg aber langsam, so haben dabei entstehende Wärmespannungen die Möglichkeit, sich durch Relaxation teilweise abzubauen.

Gerade dieser Effekt der Spannungsrelaxation kann bei mehreren Wechseltemperaturzyklen den Spannungshaushalt eines Bauteiles grundsätzlich verändern. Da die Spannungsrelaxation jenseits der Glasübergangstemperatur (amorphe Thermoplaste) bzw. des Kristallitschmelzbereiches (teilkristalline Thermoplaste) sehr schnell erfolgt, besitzt die obengenannte Gleichung nur unterhalb dieser Temperaturgrenze Gültigkeit.

Zur Verdeutlichung wird der Wärmespannungsverlauf als Funktion der Zeit eines in die Zugprüfmaschine eingespannten Probekörpers bei mehreren Wechseltemperaturzyklen aufgetragen (Abbildung 55). Dabei sollen zwecks Vereinfachung die Temperaturänderungen sprunghaft erfolgen (im Allgemeinen technisch nicht realisierbar).

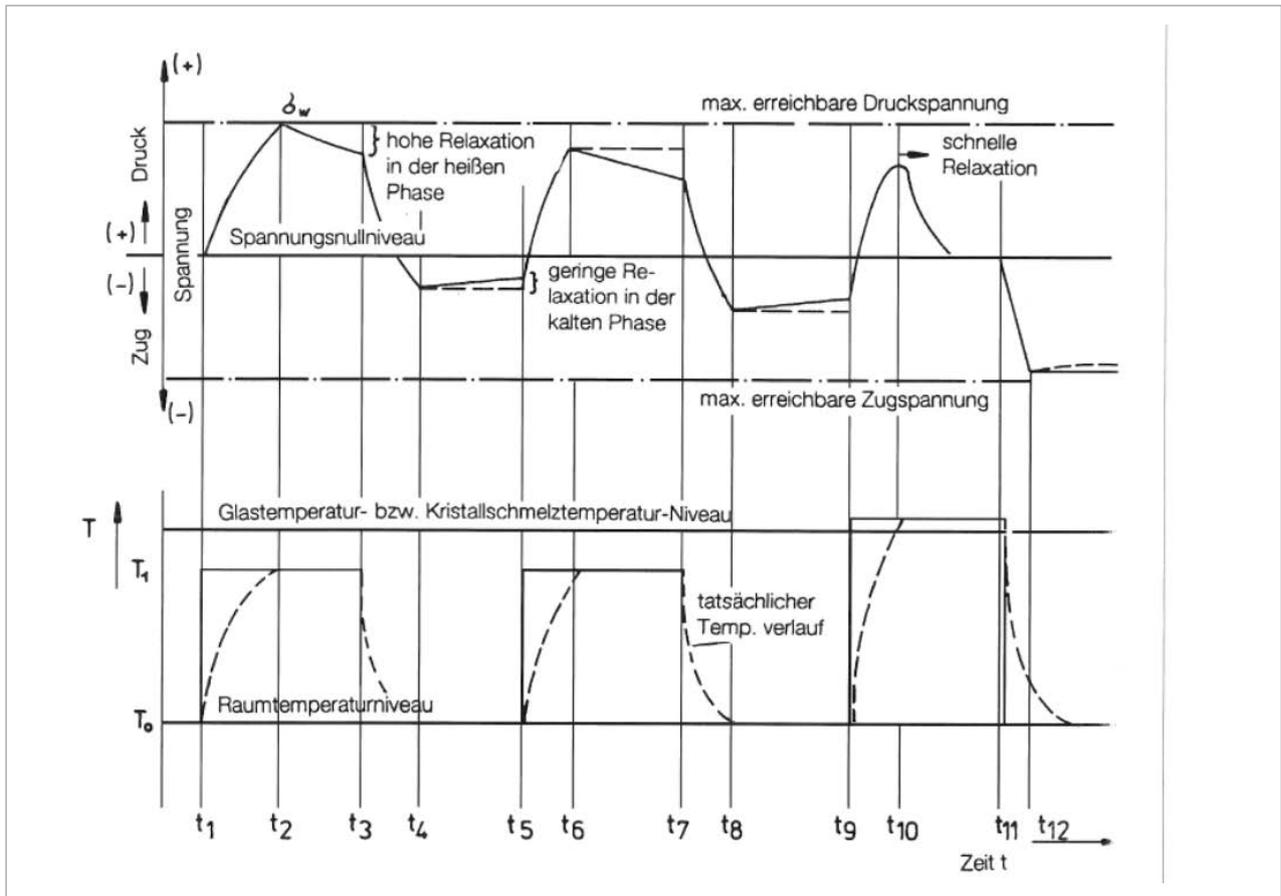


Abbildung 55: Spannungsverlauf bei Wechseltemperaturen

Wird der in der Zugprüfmaschine fest eingespannte Probekörper mit einer Temperatur belastet, so stellt sich mit einer gewissen zeitlichen Verzögerung (Kunststoff ist ein schlechter Wärmeleiter) eine Druckspannung σ_w ein. Zum Zeitpunkt t_1 befindet sich der Prüfling mit seinem gesamten Querschnitt auf dem Temperaturniveau T_1 . Bei konstantem Temperaturverlauf setzen bei t_2 Relaxationsprozesse ein, d. h. die Spannung nimmt degressiv über die Zeit ab. Zum Zeitpunkt t_3 wird das ursprüngliche Temperaturniveau T_0 wiederhergestellt. Die Spannungsänderung $\Delta\sigma$ zwischen dem Zeitpunkt t_2 und t_3 ist betrags-

mäßig nahezu gleich groß wie die beim Aufheizvorgang. Bedingt durch den Relaxationsprozess in der warmen Phase wird zum Zeitpunkt t_4 ein Spannungsniveau erreicht, das unterhalb des Ausgangsniveaus liegt.

Der Probekörper weist jetzt nach dem ersten Wechseltemperaturzyklus Zugeigenspannungen auf. Im Zeitintervall t_4 bis t_5 wird die Temperatur weiterhin konstant gehalten. Auch im kalten Bereich findet eine, jedoch wesentlich geringere, Spannungsrelaxation statt. Dabei ist die Relaxationsgeschwindigkeit in Abhängigkeit zur

Temperatur zu sehen. Dies erklärt das höhere Spannungspotential nach dem zweiten Wechseltemperaturzyklus.

Tendenziell ist schon jetzt zu erkennen, dass nach weiteren Wechseltemperaturzyklen eine stetige Verlagerung der Wärmespannung aus dem Druck in den Spannungsbereich stattfindet. Die dabei maximal erreichbare Zugspannung hat ebenfalls den Betrag von σ_w .

Nach unendlich vielen Zyklen wird sich jetzt die Wärmespannung immer zwischen dem Spannungsnullniveau und σ_w bewegen. Das bedeutet, dass bei Erreichen der Maximaltemperatur im Betriebszyklus niemals Zugspannungen zu finden sein werden, sondern dann ein Spannungsnullniveau vorliegt.

Bei Wechseltemperaturzyklen, deren maximale Temperatur T_1 unterhalb der Einfriertemperatur eines Werkstoffes liegt, bedarf es etlicher Zyklen bzw. eines Zyklus mit langanhaltend hoher Temperatur, um die Spannungskurve gänzlich in den Spannungsbereich zu verlagern. Anders verhält es sich bei Erwärmung des Werkstoffes oberhalb der Einfriertemperatur. Hier bauen sich oberhalb dieses Nullniveaus die Druckspannungen so schnell ab, dass schon nach kurzer Zeit ein ausgeglichenes Spannungsniveau erreicht wird. Erfolgt jetzt eine Abkühlung, so entsteht eine sehr hohe Zugspannung. Diese ist umso höher, je höher sich die Temperatur während der Warmphase eingestellt hat ($\sigma_w = f(\Delta T)$). Der soeben beschriebene Vorgang ist in Abbildung 55 im Zeitintervall t_9 bis t_{12} dargestellt.

Wärmespannungen in der Praxis

Werden z.B. bei einer Behälterauskleidung oder einem Verbundbehälter (GFK-Thermoplast) in einem Schadens-

fall klaffende Risse in der Auskleidung sichtbar, so ist dies ein eindeutiger Indikator für das Versagen infolge übergroßer Wärmespannungen.

In der Praxis kann das Wissen über solche Vorgänge wesentlich zur Ursachenfeststellung bei eventuellen Schadensfällen beitragen.

Hier ein typisches Beispiel für einen Schadensfall, bei dem zu hohe Wärmespannungen zum Versagen des Materials geführt haben:

- ein geschädigtes Bauteil zeigt klaffende Risse
- das Bauteil war einem oder mehreren Wechseltemperaturzyklen ausgesetzt
- das Bauteil war senkrecht zur Rissausbreitung in seiner Wärmedehnung behindert

Aufgrund der entstehenden Wärmespannungen ist daher jeder Versuch zwecklos, Eigenspannungen, die zwischen zwei festen Punkten eines Teiles herrschen, durch Tempern beseitigen zu wollen, da im Gegenteil die schädlichen Zugspannungen bedingt durch Wärmespannungen noch zunehmen (das kann auch für Verbundbauteile gelten).

Orientierungen

Eigenspannungen entstehen durch eine energieelastische Deformation, d.h. Atomabstände und Valenzwinkel verändern sich durch Einbringen von z.B. thermischer Energie. Es erfolgt dabei eine Änderung der inneren Energie und somit auch des Volumens. Im Gegensatz dazu bleibt das Volumen bei der Orientierung konstant. Diese Orientierung der Moleküle wird entweder verursacht durch:

- **Schubkräfte**, wie sie beim Fließen von Schmelzen in Kanälen (Extrudieren), zwischen bereits erstarrten Kunststoffwandungen (Spritzgießen) oder zwischen Walzen (Kalandrieren) auftreten
- **Dehnkräfte**, wie sie z.B. beim Zugversuch, bei der Blasfolienextrusion oder im Einlaufbereich von Düsen bzw. an Querschnittverengungen entstehen

Kühlen solche durch Schub- oder Dehnkräfte orientierten Kunststoffschmelzen über den Kristallitschmelzbereich bzw. die Glasatemperatur hinweg ab, so frieren diese Orientierungen ein und die Moleküldeformation bleibt unterhalb der Einfriertemperatur erhalten. Erst oberhalb dieser Einfriertemperatur nehmen die Moleküle wieder ihre statistisch ungeordnete Knäuelgestalt ein, wenn nicht Kräfte für das Aufrechterhalten der Deformation sorgen. Wird ein orientierter Probekörper in eine Kraftmesseinrichtung eingespannt (z.B. Zugprüfmaschine) und über die Einfriertemperatur hinaus erwärmt, so treten (Zug-) Kräfte auf, die umso größer werden, je stärker der Stab orientiert ist. Deshalb wird des Öfteren im Zusammenhang mit der Orientierung auch von „eingefrorenen Spannungen“ gesprochen.

Hier entsteht häufig eine Verwechslung mit dem Begriff „Eigenspannungen“ (siehe Kapitel 9.1 Spannungsarten), die beim Abkühlen von Schmelzen entstehen. Orientierungen und Eigenspannungen sind jedoch in ihrer Entstehung und auch in ihrer Auswirkung grundsätzlich verschieden.

Dieser Unterschied lässt sich am Beispiel eines dickwandigen Tiefziehteiles aufzeigen. Dickwandige Platten besitzen einen annäherungsweise parabelförmigen Abkühlleistungungsverlauf mit Druckspannungen auf den Außenseiten und Zugspannungen im Zentrum.

SIMONA produziert auf Anfrage Platten, die speziell für das Tiefziehen geeignet sind. Solche Platten besitzen ein hohes Orientierungsniveau. Dies hat folgenden Grund:

Beim Tiefziehen wird die kalte Platte in einen Metallrahmen fest eingespannt. Die durch die Erwärmung verursachte Wärmedehnung wird in axialer Richtung behindert, hervorgerufen durch die feste Einspannung. Aus diesem Grund beginnt sich die Platte zu wellen. Beim Überschreiten der Glasatemperatur (amorphe Thermoplaste) bzw. der Kristallschmelztemperatur (teilkristalline Thermoplaste) beginnen entropieelastische Rückstellkräfte zu wirken. Die Makromoleküle haben das Bestreben, den Zustand größter Entropie und somit „Unordnung/Knäueligkeit“ einzunehmen. Die gereckten, orientierten Makromoleküle ziehen sich wieder zusammen. Die Wellenbildung geht zurück, die Platte spannt sich. Erst mit weitersteigender Temperatur wirken sich die viskosen Eigenschaften der Schmelze aus und es wird Stützluft benötigt, um die Platte nahezu eben zu halten.

Beim nun folgenden eigentlichen Tiefziehen wird der Werkstoff wieder mehr oder weniger stark verstreckt. Das Tiefziehteil besitzt eine größere Oberfläche und im Allgemeinen eine geringere Wanddicke als die Ausgangsplatte. Es findet erneut eine Orientierung statt.

Ist die eigentliche Formung beendet, wird das tiefgezogene Teil aus wirtschaftlichen Gründen möglichst schnell abgekühlt. Hierbei frieren die beim Verstrecken eingebrachten Orientierungen infolge von Dehnkräften ein. So kann unter Umständen das Tiefziehteil einen höheren Orientierungsgrad besitzen als die Ausgangsplatte. Bedingt durch die schroffe Abkühlung, die aus verfahrenstechnischen Gründen im Allgemeinen einseitig erfolgt

(eine Werkzeugkühlung ist beim Tiefziehen selten zu finden), werden zusätzlich Abkühleigenspannungen in das Tiefziehteil eingebracht. Werkzeugseitig entstehen beim Abkühlprozeß Zugeigenspannungen, da hier die Abkühlgeschwindigkeit geringer ist als auf der gegenüberliegenden, der Kühlung zugewandten Seite. Diese wird später Druckeigenspannungen aufweisen. Die Spannungsverteilung des Tiefziehteiles verläuft demnach linear, im Gegensatz zum parabelförmigen Eigenspannungsprofil der Ausgangsplatte.

Wie beim Tiefziehprozess, können sich auch bei jedem anderen Umformungsprozess sowohl der Eigenspannungs- als auch der Orientierungszustand ändern (z.B. Abkantschweißen, Warmbiegen etc.).

9.4 Einfluss von Orientierungen auf die Eigenschaften von Kunststoffen

Orientierungen an extrudierten Kunststoffhalbzeugen besitzen meist eine Vorzugsrichtung. So ist z.B. der Orientierungsgrad bei extrudierten Platten in Extrusionsrichtung größer als quer dazu. Gepresste Platten hingegen besitzen nur sehr geringe Orientierungen, da beim Pressen keine Fließvorgänge der Schmelze stattfinden. Das Verhalten von gepressten Platten ist daher nahezu isotrop, d.h. sie weisen in allen Richtungen gleiche Eigenschaften auf. Dagegen verhalten sich orientierte Kunststoffhalbzeuge anisotrop, so dass ihre physikalischen Eigenschaften richtungsabhängig sind.

Die mechanischen Eigenschaften sind generell in Orientierungsrichtung höher als quer dazu. In Bezug auf die Wärmedehnung tritt der gleiche Fall auf.

Festigkeit σ_B : $\sigma_{B\parallel} > \sigma_{B,\text{isotrop}} > \sigma_{B\perp}$

Schlagzähigkeit (auf Richtung der Probenentnahme bezogen) a_n : $a_{n\parallel} > a_{n,\text{isotrop}} > a_{n\perp}$

Wärmespannung α : $\alpha_{\parallel} > \alpha_{\text{isotrop}} > \alpha_{\perp}$

Mit \parallel = parallel zur Orientierungsrichtung (Extrusionsrichtung) und \perp = senkrecht zur Orientierungsrichtung (quer zur Extrusionsrichtung).

Die Zunahme der mechanischen Festigkeit in Orientierungsrichtung erklärt sich dadurch, dass bei äußeren Belastungen hier primär die Hauptvalenzbindungen die äußeren Kräfte aufnehmen müssen, während dies bei Beanspruchung in Querrichtung durch die zwischenmolekularen Verbindungen oder Nebervalenzbindungen geschieht.

Da die Entropieelastizität erst bei Temperaturen über der Einfrier- bzw. Kristallitschmelztemperatur einsetzt, ist es nicht möglich, durch konventionelles Tempern Orientierungen zu beseitigen. Die entropieelastischen Rückstellkräfte kommen erst jenseits dieser Temperaturgrenzen zum Tragen.

9.5 Schrumpfung

Eine andere gebräuchliche Bezeichnung für den Schrumpfung ist der „Memory Effekt“, der besonders beim Vorgang des Extrudierens sichtbar wird. Bei der Extrusion eines Stranges vergrößert dieser seinen Umfang und verkürzt sich etwas.

Die in der ruhenden Schmelze ursprünglich verknäuelten und verschlauften Moleküle werden im Extruder infolge einer Scherbelastung orientiert und gestreckt. Nach Verlassen der Düse versuchen sie, diese aufgezwungene Orientierung rückgängig zu machen, d.h. sie möchten

ihre ursprüngliche Gestalt wieder einnehmen (Memory Effekt).

Durch eine schnelle Abkühlung der Kunststoffschmelze werden die Moleküle daran gehindert, ihren verknäuelten Zustand wieder einzunehmen und ein größerer Anteil der Orientierung bleibt erhalten, d.h. er wird „eingefroren“.

Bei Erwärmung bis oder über die „Einfriertemperatur“ hinaus setzt wieder der obige Memory Effekt ein.

9.6 Schwindung

Wie bei jedem Werkstoff vergrößert sich auch das Volumen der Kunststoffe mit steigender Temperatur, besonders beim Übergang in den Schmelzzustand. Umgekehrt verkleinert sich das Volumen beim Erkalten. Da diese Erscheinung bei allen Verarbeitungsverfahren auftritt, muss der Volumenkontraktion, besonders bei der Herstellung von Kunststoff-Formteilen, Rechnung getragen werden, wenn hierbei eine hohe Maßhaltigkeit erreicht werden soll.

Bei der konstruktiven Berücksichtigung der Schwindungsmaße wird zwischen Verarbeitungsschwindung (VS) und Nachschwindung (NS) unterschieden. Als Verarbeitungsschwindung bezeichnet man den Unterschied zwischen dem Maß eines kalten Thermoformwerkzeugs und dem des erkalteten Thermoformteiles nach 16 Stunden Lagerung im Normklima der Verarbeitung (nach DIN 16742). In der Praxis wird jedoch meist nach 24 Stunden gemessen. Danach setzt die Nachschwindung ein, die sich über Stunden und sogar Tage erstrecken kann. Dieser Vorgang ist der Unterschied zwischen dem Maß des erkalteten und dem des gleichen, einer Warmlagerung ausgesetzten Pressteiles.

9.7 Einflüsse auf die Bauteilfestigkeit

9.7.1 Kerbwirkung

Bei der Berechnung von Bauteilspannungen wird meist von einem gleichförmigen (Zug-) bzw. linearen (Biege-) Spannungsverlauf über den gesamten Querschnitt ausgegangen (Abbildung 56).

Am real beanspruchten Bauteil existieren solche gleichförmigen Lastverteilungen jedoch nicht.

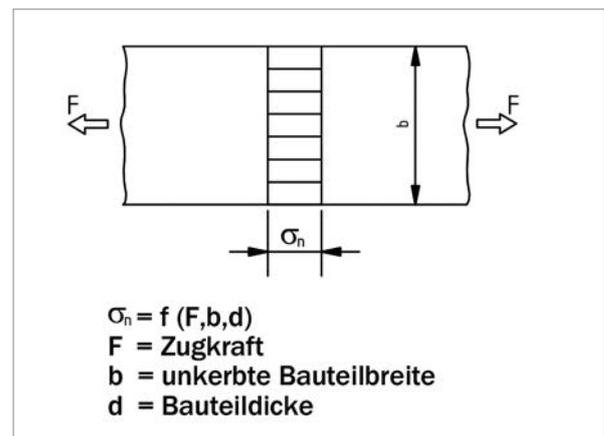


Abbildung 56: Theoretische Betrachtung der gleichförmigen Spannungsverteilung

Inhomogenitäten im Werkstoff, Füllstoffe, Kratzer in der Oberfläche, Kerben und Kanten beeinflussen die Spannungsverteilung ganz erheblich. An den Flanken solcher inneren bzw. äußeren Kerben entsteht aufgrund der geometrischen Inhomogenität eine Spannungsspitze (Abbildung 57).

Diese Spannungserhöhung ist stets größer als die rechnerische (Effektiv- oder Nenn-) Spannung bei Annahme einer linearen Spannungsverteilung. Die Spannungsspitze wird durch die Größe der Kerbe, den Rundungsradius im Kerbgrund und die Beanspruchungsart beeinflusst.

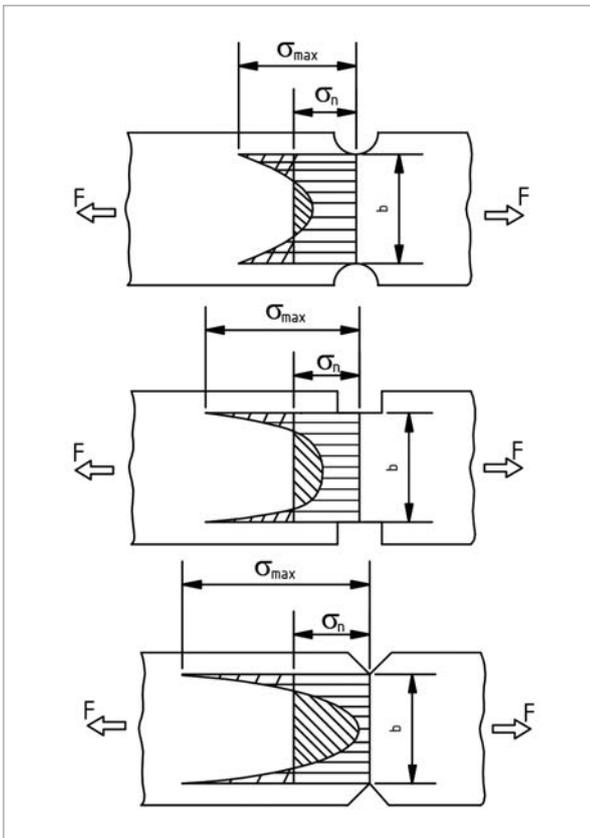


Abbildung 57: Spannungsverteilung an gekerbten Proben

Wie in Abbildung 57 zu erkennen, kann die Kerbwirkung durch möglichst stetige Übergänge klein gehalten werden. Je tiefer und schärfer die Kerbe ausgebildet wurde, desto höher wird die Spannungsspitze am Kerbgrund sein.

Für das Verhalten eines Bauteiles unter Betriebsbeanspruchung ist demnach nicht allein die Festigkeit eines Werkstoffes, sondern auch die konstruktive Gestaltung und Oberflächengüte verantwortlich. Da die äußere Gestalt und die innere Homogenität des Werkstoffes die Bauteilfestigkeit stark beeinflussen, spricht man auch von der Gestaltfestigkeit.

Die nach elastizitätstheoretischen Berechnungen auftretenden Spannungen sind von der Kerbtiefe und dem Kerbradius abhängig. Diese zu beurteilen und in der rechnerischen Auslegung von Bauteilen zu berücksichtigen, setzt bei Kunststoffen große Erfahrung voraus. Die Elastizitätstheorie und die Bruchmechanik, die die geometrische Inhomogenität von Werkstoffen behandelt, wurde für rein elastische Materialien entwickelt. Somit sind diese Überlegungen nur bedingt auf Thermoplaste übertragbar.

9.7.2 Schweißen von Thermoplasten

Unter Schweißen versteht man das unlösbare Verbinden von thermoplastischen Kunststoffen unter Anwendung von Wärme und Druck mit oder ohne Verwendung eines Zusatzwerkstoffes. Alle Schweißvorgänge finden im plastischen Werkstoffzustand der Fügeflächengrenzbereiche statt. Dort verknüpfen und verschlingen sich die Fadenmoleküle der gegeneinandergedrückten Fügeile zu einer homogenen Werkstoffverbindung.

9.7.2.1 Verschweißbarkeit von Werkstofftypen

Grundsätzlich können nur Kunststoffe der gleichen Art, also z.B. PP mit PP, und innerhalb dieser nur solche mit gleichem oder ähnlichem (benachbartem) Molekulargewicht und gleicher Dichte miteinander verschweißt werden, wobei die Einfärbung unberücksichtigt bleiben kann. Dies bedeutet, dass bestimmte Werkstoffe grundsätzlich nur innerhalb einer bzw. zweier benachbarter Schmelzindexgruppen mit ausreichender Sicherheit miteinander verschweißt werden können.

Die Schmelzindexgruppen der Werkstoffe können den Formmassenbezeichnungen (PE nach DIN EN ISO 17855-1, PP nach DIN EN ISO 19069-1, PVC-U nach DIN EN ISO 1163-1, Fluorpolymere nach DIN EN ISO 12086-2) entnommen werden. Hart- und Weichpolyethylen können nicht miteinander verschweißt werden. Eine Ausnahme hierzu bildet z.B. die Möglichkeit einer ausreichenden Verbindung durch Schweißen von PVC-U mit Acrylglas (PMMA).

Bei PE-HD wird zwischen PE 63, PE 80 und PE 100 unterschieden, die grundsätzlich miteinander verschweißt werden können. Bei PP wird zwischen PP-H, PP-B und PP-R unterschieden, die ebenfalls miteinander verschweißt werden können. Für den Werkstoff PVDF gibt es zurzeit keine Norm bzw. Typeneinteilung. Am Markt sind hier jedoch zwei Polymerisationsverfahren bekannt, mit denen der Rohstoff PVDF hergestellt werden kann. Obwohl die Eigenschaften im Detail teilweise unterschiedlich sind, trifft dies nicht auf das Schweißen zu.

PE-HD

Materialien mit einer Schmelzmassefließrate MFR (190/5) 0,2 - 1,7 g/10 min. sind für die Schweißung geeignet. Dies bedeutet, dass die Schmelzeviskosität bei der Erwärmung sehr ähnlich ist. Diese Aussage ist in DVS 2207-1 enthalten und wurde auch vom DVGW (Deutscher Verband für Gas und Wasser) in einer Verlautbarung bestätigt.

PP-H, PP-B, PP-R

Die Schweißbarkeit ist innerhalb der Schmelz-Massefließrate MFR (230/2,16) 0,2 - 0,6 g/10 min. beziehungsweise MFR (190/5) 0,4 - 1,0 g/10 min. gegeben. Diese Aussage können Sie in der DVS 2207-11 nachlesen.

PVDF

Wie bereits erwähnt, existieren im Markt zwei verschiedene Polymerisationsverfahren: Emulsions- und Suspensions-PVDF. Die DVS-Richtlinie 2207-15 behandelt sowohl das Heizelementstumpf- wie auch das Heizelementmuffenschweißen von extrudierten Rohren, Formteilen und Platten. Diese Richtlinie beschreibt die Schweißung von PVDF unabhängig vom Herstellverfahren. Wenn die Dichte zwischen 1,7 und 1,8 g/cm³ und der Schmelzindex MFR (230/5) zwischen 1,0 und 25 g/10 min. liegt, kann von einer uneingeschränkten Schweißung ausgegangen werden.

ECTFE

Da es sich beim ECTFE um ein verhältnismäßig neues Material handelt und somit die Langzeitkennwerte noch nicht komplett nachgewiesen sind, ist es in den DVS-Richtlinien noch nicht komplett zu finden. Die Kennwerte für das Warmgasziehschweißen sind in der DVS 2207-3, Beiblatt 3 gelistet.

9.7.2.2 Schweißverfahren

Die verschiedenen Schweißmethoden zum Verbinden thermoplastischer Kunststoffbauteile unterscheiden sich im Wesentlichen in der Art, wie die Wärme in die Schweißzone gebracht wird.

Im industriellen Maßstab haben sich folgende Schweißverfahren etabliert:

- Warmgasziehschweißen
- Warmgasfächelschweißen
- Warmgasextrusionsschweißen
- Heizelementstumpfschweißen
- Heizelementmuffenschweißen
- Heizwendelschweißen
- Reibschweißen

Für weitere Details sei an dieser Stelle auf die DVS 2207 verwiesen, die eine genaue Beschreibung der einzelnen Schweißverfahren enthält und auch auf die einzelnen Schweißnahtformen eingeht.

Eine kleine Einführung zum Thema bietet auch unsere work.info „Schweißen“, welche Sie auf unserer Webseite unter www.simona.de/download herunterladen können.

9.7.2.3 Gestaltfestigkeit

Grundlage einer guten Schweißnahtqualität ist die Beachtung der rohstoffbedingten Einflüsse, der Herstell- bzw. Verarbeitungsbedingungen der Halbzeuge sowie der optimalen Fügezonenausbildung. Innere und äußere Kerben sowie ungünstige Wanddickenübergänge ergeben eine Gestaltfestigkeit, die teilweise wesentlich unter der eigentlichen Werkstofffestigkeit liegen kann. Schweißverbindungen stellen in jedem Fall eine Inhomogenität dar. Da Schweißnähte in den meisten Fällen nicht abgearbeitet werden, ergeben sich zudem auch Unregelmäßigkeiten an der Oberfläche, welche die Gestaltfestigkeit negativ beeinflussen können.

In der Abbildung 58 sind vier verschiedene Eckverbindungen unterschiedlicher Gestaltung aufgezeigt. Werden diese Eckverbindungen einer Biegebeanspruchung ausgesetzt, so zeigt sich, dass rechtwinklige Eckverbindungen generell wesentlich ungünstiger sind als gerundete Ecken mit Fügstellen außerhalb der Rundung. Rundungen erlauben immer eine günstige Spannungsverteilung und ergeben eine bis zu 10-fach höhere Gestaltfestigkeit als konventionelle rechtwinklige Eckverbindungen.

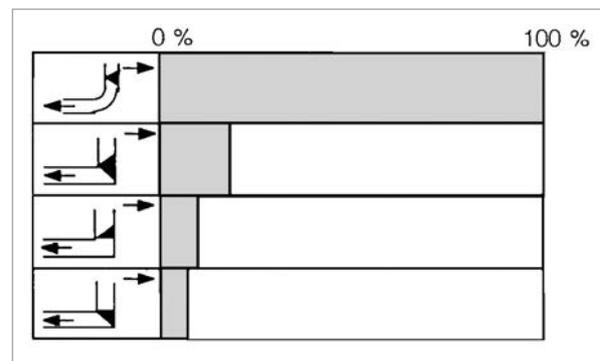


Abbildung 58: Schweißnahtfestigkeit als Funktion der Schweißnahtlage bei Eckverbindungen

T-förmige Verbindungen zeigen bei einseitig geschweißter Naht ein erheblich ungünstigeres Verhalten als bei zweiseitiger Schweißung (Abbildung 59).

Wichtig ist auch hier, dass auf der Zugseite des beanspruchten Teiles keine Kerben vorhanden sind. Kehlnähte stellen eine gewisse Rundung dar. Diese verringern die Spannungsüberhöhung, so dass sich eine hohe Gestaltfestigkeit ergibt.

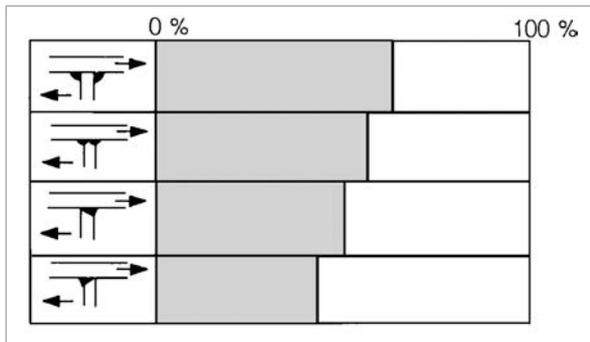


Abbildung 59: Schweißnahtfestigkeit als Funktion der Schweißnahtlage bei T-förmigen Verbindungen

In Abbildung 60 sind Verbindungen dargestellt, die einer Zugbeanspruchung ausgesetzt werden. Im Nahtbereich entstehen Zug- bzw. Scherspannungen. Eine abgearbeitete V-Naht ergibt eine hohe Gestaltfestigkeit, da keinerlei geometrische Inhomogenität vorliegt. Bei einfachen Laschenverbindungen (untere Zeile in Abbildung 60) entstehen sowohl Schub- und Zugkräfte als auch Biegemomente in der Schweißnaht. Die Gestaltfestigkeit ist sehr gering. Im Gegensatz dazu erlaubt die doppelte Laschenverbindung (obere Zeile in Abbildung 60) eine gleichmäßige Verteilung der Kräfte. Diese Verbindungsart besitzt eine hohe Gestaltfestigkeit. Gleiches gilt für Kreuzverbindungen. Die höchste Schweißnahtfestigkeit ergibt sich somit bei der oberen doppelten Laschenverbindung.

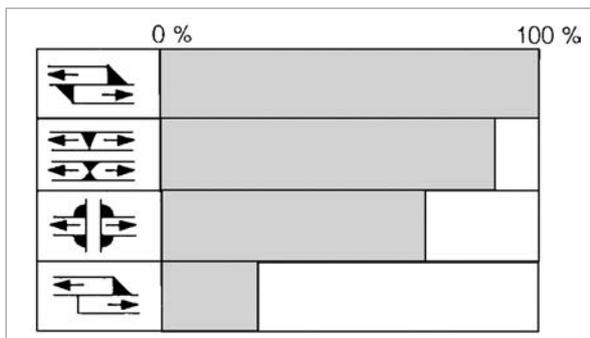


Abbildung 60: Verbindung von Platten in einer Ebene

9.7.2.4 Lage von Schweißnähten

In den folgenden Gestaltungsdarstellungen sind die Erkenntnisse aus vorherigen Erläuterungen zu praktischen Beispielen umgesetzt. Detailliertere Ausführungen sind in den schweißtechnischen Gestaltungsgrundsätzen der DVS 2205-3 zu finden.

Bei tragenden Nähten oder bei Kehlnähten sind die Schweißnähte so zu dimensionieren, dass die erforderlichen Querschnitte zur Kraftübertragung ausreichen. Stumpfstöße sind vorzuziehen. V-Nähte sind an der Wurzel gegenzuschweißen. Übergänge im Kraftverlauf sind bei Stumpfstößen unterschiedlicher Wanddicken anzustreben (Abbildung 61).

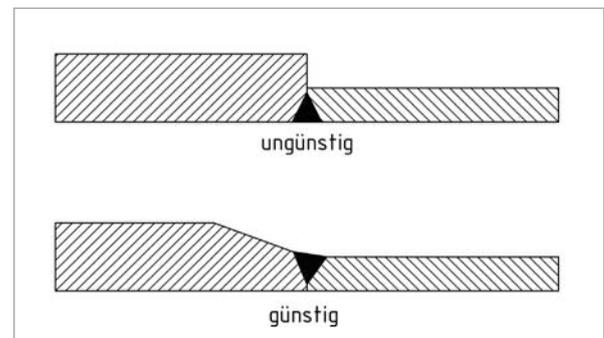


Abbildung 61: Einfluss der Schweißnaht bei Querschnittsänderung

Schweißnähte sollten aus der Ecke herausgezogen werden. Rundungen bei Eckverbindungen ergeben einen günstigeren Kraftverlauf (Abbildung 62).

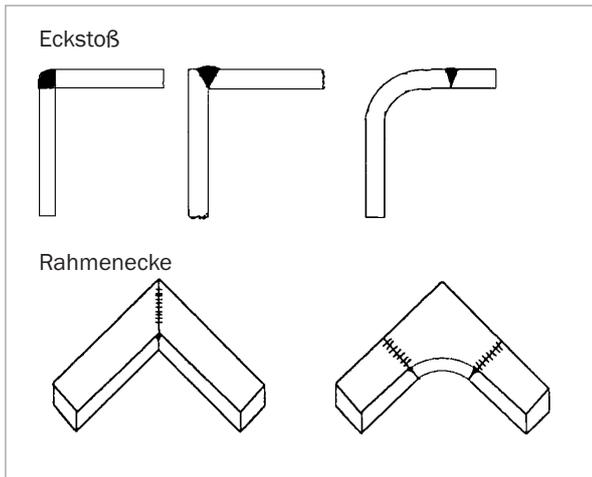


Abbildung 62: Eckgestaltung

Schweißnahtanhäufungen sind zu vermeiden.
Nahtkreuzungen sind unzulässig (Abbildung 63).

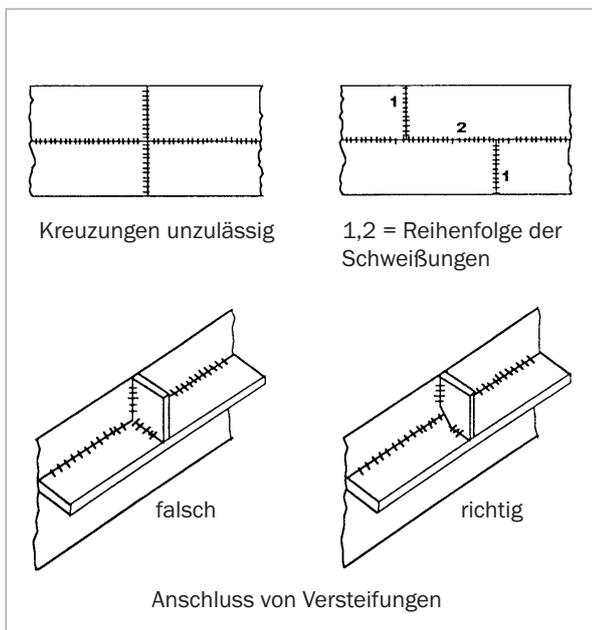


Abbildung 63: Schweißnahtanhäufungen

9.8 Spannungen

Beim Verschweißen von Thermoplasten bilden sich in Abhängigkeit vom Schweißverfahren verschiedene Spannungszustände. Diese bilden sich innerhalb der Schweißnaht quer, längs und bei dickeren Halbzeugen auch senkrecht aus. Hervorgerufen werden diese Spannungen durch örtliches Erwärmen in Verbindung mit einer ungleichmäßigen Abkühlung.

Beim Erwärmen des Werkstoffes in der Schweißnahtzone werden durch die thermische Längenänderung Druckspannungen aufgebaut, wobei während des Schweißvorganges eine teilweise Relaxation dieser Spannungen durch das plastische Verhalten des Werkstoffes stattgefunden hat. Bei dem nachfolgenden Abkühlen bilden sich Wärmegugspannungen. Während die im Schweißnahtquerschnitt auftretenden Längsspannungen vom Schweißverfahren unabhängig sind, ist dies bei den gleichfalls auftretenden Querspannungen nicht der Fall. Entscheidend für die Höhe der Querspannungen ist, ob die zu verschweißenden Platten fest eingespannt sind oder ob sie frei beweglich sind.

Beim Warmgasschweißen ist der Schweißnahtaufbau für die Höhe der Querspannung verantwortlich. Aufgrund der bereits erwähnten Spannungsrelaxation entstehen Wärmegugspannungen im Anfangsbereich. Mit weiter fortschreitendem Schweißen bildet sich im gesamten Schweißnahtbereich die gleichfalls fortschreitende Zugspannung aus. Aufgrund der Spannungsrelaxation bauen sich im Anfangsbereich der Schweißnaht die Zugspannungen zunächst leicht ab, mit Fortschreiten des Schweißvorganges jedoch wieder auf. Das heißt, eine Warmgasschweißnaht weist in Längsrichtung lediglich Zugspannungen auf, womit das Wölben der geschweißten Platten zu erklären ist (schematische Darstellungen: Abbildungen 64 & 65).

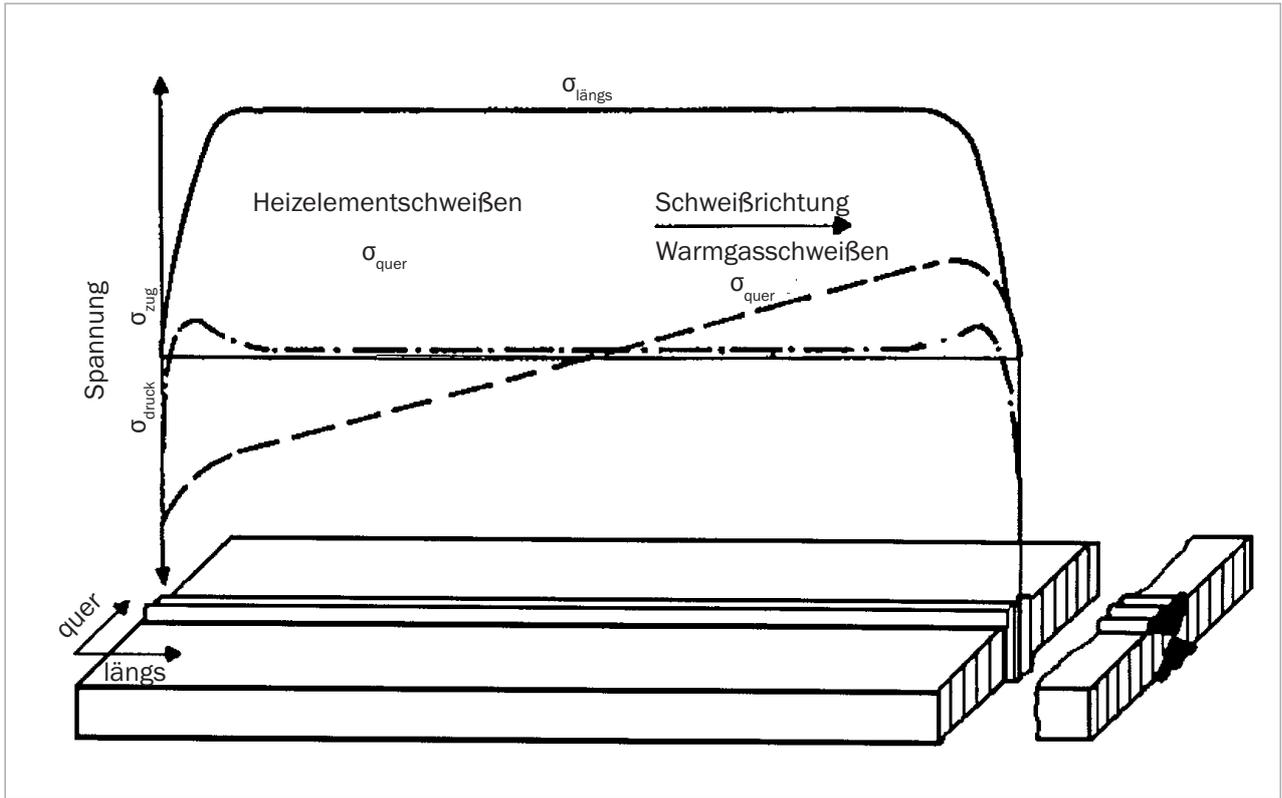


Abbildung 64: Verlauf der Schweißspannungen über die Länge der Schweißnaht beim Heizelementstumpf- und Warmgasschweißen (nach Menges)

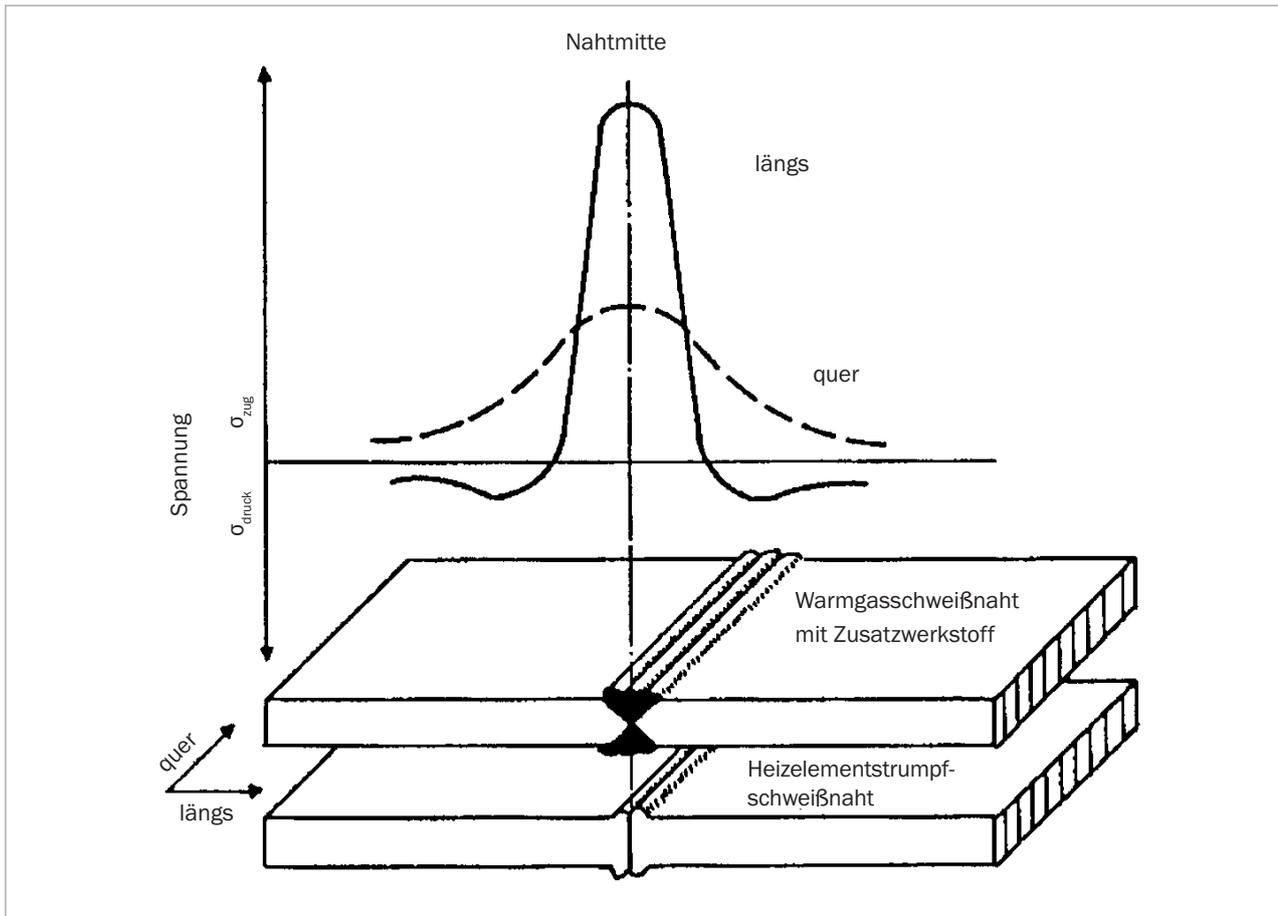


Abbildung 65: Verlauf der Schweißspannungen über dem Schnitt senkrecht zur Schweißnaht. Die Höhe der Querspannungen bei der Heizelementstumpfnah ist stark von der Höhe und Dauer des Schweißdruckes abhängig (nach Menges)

9.9 Spannungsrissbildung

Sämtliche thermoplastische Werkstoffe neigen mehr oder weniger zur Spannungsrissbildung. Vor allem die amorphen Thermoplaste wie Polystyrol und PMMA sind sehr anfällig gegenüber Spannungsrissen, die wegen der meist glasklaren Struktur dieser Kunststoffe optisch leicht wahrgenommen werden können. Bei eingefärbten, teilkristallinen Thermoplasten sind Spannungsrisse oft nicht zu erkennen, so dass dann ausschließlich die Auswirkungen, wie Leckagen, auf sie hindeuten. Auch bei Metallen ist dieses Phänomen bekannt. Dort spricht man von Spannungsrisskorrosion, verursacht durch mechanische Beanspruchung im Zusammenwirken mit chemischen bzw. elektrochemischen Vorgängen.

Die Spannungsrisse in Kunststoffen hingegen beruhen primär auf physikalischen Vorgängen, so dass bei Kunststoffen besser von Spannungsrissbildung gesprochen werden sollte. Innerhalb eines Risses kommt es zu einer starken Verstreckung der Moleküle, die an den Rissflanken verankert sind und der Rissöffnung entgegenwirken. Zum Auftreten von Spannungsrissen an Kunststoffteilen bedarf es zweier auslösender Faktoren, die beide zusammen auftreten müssen:

1. Das Teil muss unter Zug- oder Biegebeanspruchung stehen.
2. Es bedarf der Anwesenheit eines für diesen Werkstoff rissauslösenden Mediums.

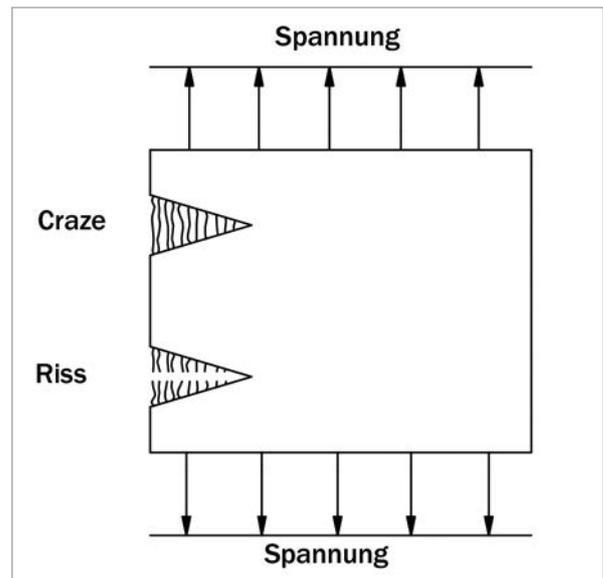


Abbildung 66: Rissbildung in einem Kunststoff

Drei physikalische Effekte beeinflussen die Spannungsrissbildung in Kombination mit an der Oberfläche wirkenden mechanischen Spannungen:

1. Benetzung
2. Quellung
3. Diffusion

Durch die auftretenden Zugspannungen an der Oberfläche eines Bauteiles entstehen „Crazes“ (Fließzonen), die noch keine größere Werkstoffschädigung darstellen. Es handelt sich um Bereiche stark verstreckter Molekülketten, deren Enden in amorphen Bereichen verankert sind und somit der Rissöffnung entgegenwirken (Abbildung 66). Das Auftreten von Crazes bedeutet nicht notwendigerweise eine Schädigung des Materials, jedoch eine Schwachstelle im Gefüge. Durch Benetzung und Diffu-

sion gelangt nun das angreifende Medium in oberflächennahe Fließzonen und dringt dort bis zum Kerbgrund vor. Dort entsteht durch physikalische Wechselwirkung eine Verminderung der Bindungskräfte. Dieser Vorgang begünstigt die Beweglichkeit der Makromoleküle, so dass die wirkenden äußeren oder inneren Spannungen durch die Bildung neuer oder das Anwachsen bestehender Fließzonen abgebaut werden. Es kommt zu einem Risswachstum.

Hohe Temperaturen begünstigen im Allgemeinen die Bildung von Spannungsrissen. Quellung und Diffusion bewirken ebenfalls eine Beschleunigung der Rissausbreitung.

Im chemischen Apparatebau tritt die Spannungsrissgefährdung in der Regel nur in Kombination mit Medium und mechanischen Spannungen auf. Mechanisch unbelastete Halbzeuge, wie Platten oder Rohre, sind nicht gefährdet. Besonders gefährdet sind vielmehr Füge- und Umformbereiche, in denen hohe Restspannungen verbleiben. Vor allem Warmgasschweißnähte und kaltgebogene Halbzeuge sind aufgrund des hohen Eigenspannungsniveaus häufig von Spannungsrissen betroffen. Stumpfschweißnähte, warmgebogene Kanten und Abkantschweißungen sind dagegen weniger kritisch.

Um die Gefahr der Spannungsrissbildung zu reduzieren, ist am besten eine nachträgliche Wärmebehandlung (Tempern) geeignet, deren Temperatur bei teilkristallinen Thermoplasten um ca. 20 °C unterhalb des Kristallitschmelzpunktes liegt, bei amorphen dagegen knapp unterhalb der Glastemperatur. Die erforderlichen Wärmebehandlungszeiten hängen von der Wanddicke der Materialien ab.

9.9.1 Eigenspannungen

In den Anfängen der Kunststofftechnik wurden Platten aus Thermoplasten ausschließlich im Pressverfahren hergestellt. Mit der Einführung der Extrusionstechnik konnte durch dieses kontinuierliche Verfahren die Produktivität und Wirtschaftlichkeit erhöht werden. Heute sind Extrusionsplatten nicht nur im PVC-Sektor von wesentlicher Bedeutung. Extrudierte Thermoplaste können bis zu Wanddicken von 50 mm gefertigt werden.

Die Eigenschaften einer extrudierten Platte sind in und quer zur Extrusionsrichtung unterschiedlich. Dies trifft auf die mechanischen, wie auch auf die thermischen Eigenschaften zu. Auch das Spannungsniveau einer extrudierten Platte ist höher als das einer gepressten Platte. Daher bietet eine gepresste Platte überall dort Vorteile, wo bei der Anwendung ein geringes Eigenspannungsniveau notwendig ist oder isotrope mechanische Eigenschaften gefordert werden. Das geringe Eigenspannungsniveau bietet ebenfalls Vorteile hinsichtlich der Spannungsrissbildung und der Formstabilität eines Bauteiles nach der mechanischen Verarbeitung.

	Gepresste Platten	Extrudierte Platten
Eigenspannungen	gering	vorhanden
Orientierungen	nicht vorhanden	vorhanden
Anisotropie*	nicht vorhanden	vorhanden
Rückstellung bei Temperaturen nahe KSB** bzw. Glastemperatur	gering	groß
Fertigungstoleranzen	groß	klein

* Anisotropie = Eigenschaften unabhängig der Belastungsrichtung

** KSB = Kristallitschmelzbereich

Tabelle 10: Eigenschaftsvergleich von gepressten und extrudierten Platten

9.10 Berechnung der zulässigen Kaltbiegeradien

Bei der Herstellung von stehenden Rundbehältern werden die Zylindermäntel meist kalt gebogen und anschließend stumpf verschweißt. Ein nach diesem Verfahren gefertigter Zylindermantel ist mit Zugspannungen auf der Außenseite und Druckspannungen auf der Innenseite behaftet. In der Mitte des Wandquerschnittes liegt die „neutrale Faser“, die ihre ursprüngliche Länge beibehält. Durch das viskoelastische Verhalten thermoplastischer Kunststoffe klingen diese Spannungen mit der Zeit infolge der Relaxation ab. Je geringer der Biegeradius und je größer die Wanddicke, desto höher wird die kritische Zugspannung auf der Außenhaut. Mit der nachfolgend aufgezeigten Methode lässt sich die Größe der Randfaserdehnungen näherungsweise quantifizieren.

Um die Größe der Randfaserdehnung zu ermitteln, wird die Dehnung in Höhe der neutralen Faser und Randfaser errechnet. Das geschieht mit einer, für diese Zwecke umgeformten, Gleichung:

$$\varepsilon_r = \frac{50}{r} \cdot s$$

Die Randfaserdehnung ε_r verteilt sich demnach proportional zur Wanddicke s und umgekehrt proportional zum Biegeradius r . Werden auf diese Weise Randfaserdehnungen $< 0,2\%$ ermittelt, so kann über das Hookesche Gesetz auf die vorhandene Randfaserdehnung geschlossen werden. Dehnungen $< 0,2\%$ liegen im linear-viskoelastischen Bereich. Hier verhalten sich Spannung und Dehnung proportional. Mit dem E-Modul werden Zeit- und Temperatureinfluss berücksichtigt. Aus diesem Grund muss der E-Modul in die Gleichung des Hookeschen Gesetzes als Relaxationsmodul eingesetzt werden. Das Hookesche Gesetz lautet:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

In der einschlägigen Literatur sind Angaben über den Relaxationsmodul nur schwer zu finden. Ersatzweise kann der Kriechmodul herangezogen werden.

Beim Kaltbiegen von PE ist darauf zu achten, dass die Dehnung von 1% nicht überschritten wird. Bei den Werkstoffen PP, PVDF und ECTFE sollten jedoch kritischere Maßstäbe angelegt werden. Anhaltswerte für zulässige Kaltbiegeradien unter verschiedenen Randfaserdehnungen in Abhängigkeit von der Wanddicke, welche auch für den Behälterbau nach DVS angenommen werden müssen, finden Sie in Tabelle 11.

Werkstoff	Randfaserdehnung ε
PE-HD	1,00
PP-H	0,50
PP-B	0,75
PP-R	1,00
PVDF	0,50
PVC-U	0,20
CPVC	0,10

Anmerkung: Für PE 63, PE 80 und PE 100 darf der Wert für PE-HD verwendet werden.

Tabelle 11: Tolerierbare Randfaserdehnung

Werden aufgrund konstruktionsbedingter Erfordernisse geringere Biegeradien benötigt, so empfehlen wir warm zu biegen (Temperatur ist werkstoffabhängig).

Generell gilt, dass unmittelbar bei der Fertigung eines kaltgebogenen Teiles die Randfaserdehnung am höchsten ist und dann zeitabhängig relaxiert. Daher ist beim Kaltbiegen immer darauf zu achten, dass die Verformungsgeschwindigkeit gering und konstant bleibt. Ruckartige Verformungen können spontane Spannungsspitzen erzeugen, die eventuell zum Bruch führen.

Wird einem Körper eine konstante Deformation aufgezungen, so ergibt sich eine Materialbeanspruchung, deren Betrag in den ersten 100 Stunden stärker abnimmt als im Bereich zwischen der 100sten und der 1.000sten Stunde. Daher sollten solche, der Relaxation unterliegenden Bauteile unmittelbar nach der Lastaufgabe nicht zusätzlichen Beanspruchungen, wie z.B. Schlagbeanspruchung, unterzogen werden. Für PVC-U gilt allgemein, dass im Behälterbau fast keine Kaltbiegung zulässig ist. In Tabelle 12 sind die Kaltbiegeradien in Abhängigkeit von Randfaserdehnung und Wanddicke am Beispiel von PE 100 zu finden.

Randfaserdehnung = 1,0 %

Wanddick s	zulässiger Biegeradius
2 mm	0,100 m
3 mm	0,150 m
4 mm	0,200 m
5 mm	0,255 m
6 mm	0,300 m
8 mm	0,400 m
10 mm	0,500 m
12 mm	0,600 m
15 mm	0,750 m
20 mm	1,00 m
25 mm	1,25 m
30 mm	1,50 m

Tabelle 12: Kaltbiegeradien für PE 100

9.11 Alterung

Kunststoffe unterliegen, wie auch andere Werkstoffe, der Alterung. Unter Alterung versteht man die Gesamtheit aller irreversibel ablaufenden chemischen und physikalischen Vorgänge in einem Werkstoff während eines bestimmten Zeitraumes. Das sind z.B. Einwirkung von

Licht, Wärme, Feuchtigkeit sowie Erosion durch Schnee, Regen, Hagel, Staub, Sand oder auch Chemikalieneinwirkung. Zusammengefasst werden diese Vorgänge als äußere Ursachen der Alterung, thermodynamisch instabile Zustände dagegen als innere Ursachen bezeichnet.

Chemische Einflüsse können im Laufe der Zeit zu einer Änderung der Molekülstruktur oder Molekülgröße des Werkstoffes bzw. bei Mehrphasen-Kunststoffen zur Änderung einer Komponente des Werkstoffes führen und dadurch die Eigenschaft des Materials ändern. Bei physikalischen Vorgängen wird der Aggregatzustand oder das Konzentrationsverhältnis der Komponenten bei Mehrstoffsystemen verändert. Durch Erosion oder gegebenenfalls Auskreidung von Pigmenten ändert sich die Oberflächenstruktur eines Bauteiles, was unter Umständen zu einer Minderung der Gestaltfestigkeit führen kann.

Als Alterungsindikatoren können folgende physikalischen oder technologischen Messgrößen herangezogen werden:

- Zugfestigkeit
- Reißdehnung
- Schlagzähigkeit
- Viskosität
- Farbzahl
- Oberflächenglanz

9.11.1 Alterungsprozesse durch Licht

9.11.1.1 Photolyse

Beim Außeneinsatz absorbieren Kunststoffe Licht in Abhängigkeit der Wellenlängen. Vor allem die UV-Anteile

des Sonnenlichtes sind in der Lage, eine Spaltung der Hauptvalenzbindungen oder eine Abspaltung von Bestandteilen des Makromoleküls (z.B. HCl-Abspaltung bei PVC) zu bewirken. Dieser Vorgang wird Photolyse genannt. Durch Absorption des Lichtes und dessen Umwandlung in Wärme heizt sich der Kunststoff auf. Die hierdurch bedingte Temperaturerhöhung im Werkstoff kann beträchtlich sein und einen thermischen Abbau (Wärmealterung) auslösen.

9.11.1.2 Photooxidation

Im Gegensatz zur Photolyse, bei der kurzwelliges UV-Licht der auslösende Faktor ist, sind es bei der Photooxidation die langwelligen Anteile des Lichtes. Sauerstoff besitzt die Eigenschaft, in die Kunststoffoberfläche einzudiffundieren, um dort im Zusammenwirken mit langwelligem Licht eine komplizierte Folge von Radikalreaktionen auszulösen. Dies hat gleichzeitig eine Veränderung des Molekulargewichtes zur Folge. Die durch Absorption des Lichtes bedingte Temperaturerhöhung beschleunigt zusätzlich die Photooxidation.

9.11.2 Sonstige Alterungsprozesse

Einflüsse wie Regen, Schnee, Hagel, Staub und Sand bewirken eine Erosion der Kunststoffoberfläche. Eine Verschmutzung der Oberfläche, wenn sie nicht abgetragen wird, wirkt dabei der Lichteinwirkung entgegen. Staub kann zum Beispiel eine Schutzschicht gegen Lichteinwirkung bilden (s.a. oxidische Deckschicht bei Aluminium). Durch feine Haarrisse an der Oberfläche des Kunststoffes kann Wasser eindringen und bei Gefrieren eine Vergrößerung dieser Risse bewirken.

Weitere Alterungsprozesse beziehen sich auf innere Vorgänge, die durch eine Abweichung vom thermodynamischen Gleichgewicht hervorgerufen werden. Bei teilkristallinen Thermoplasten kann unter Umständen unterhalb der Kristallitschmelztemperatur eine Nachkristallisation stattfinden, wobei der Werkstoff im Allgemeinen härter und spröder wird. Auch bei amorphen Thermoplasten ist unterhalb der Glasatemperatur bedingt durch entropieelastische Effekte eine Änderung der Molekülkonstruktion möglich. Dies hat eine Erhöhung des E-Moduls, eine geringere Dehnbarkeit und vermehrte Quellbarkeit zur Folge.

9.11.3 Prüfung der Alterung

Die Änderungen der mechanischen Eigenschaften, der Viskosität, des Glanzes oder der Farbe können als Kriterien für die Alterung herangezogen werden. Das eigentliche Problem stellt die Prognostizierung des Alterungsverhaltens bei neuentwickelten Werkstoffrezepturen dar. Dafür wurden Geräte entwickelt (z.B. das QUV-Testgerät), mit denen eine künstliche Bewitterung von Kunststoffproben vorgenommen werden kann. Hierbei erfolgt eine Simulierung der Licht-, Feuchte- und Wärmeeinwirkung, wodurch eine künstliche sowie eine beschleunigte Alterung der Kunststoffproben erreicht werden. Eine Intensivierung der alterungsauslösenden Einflüsse modifiziert jedoch die verschiedenen Alterungsprozesse in unterschiedlicher Weise. Aus diesem Grund sollte jede Kurzzeitprüfung mit Freibewitterungsversuchen einhergehen. Je zeitraffender eine Prüfung ist, desto schlechter ist gewöhnlich auch ihre Korrelation zur Praxis.

Alterungsverhalten der wichtigsten

SIMONA® Thermoplaste

Polyethylen

In Hinblick auf UV-Strahlung zeigen z.B. unstabilisiertes SIMONA® PE-HD natur oder SIMONA® PE 100 natur schon nach wenigen Monaten Außenwitterung einen deutlichen Abfall von Zugfestigkeit und Reißdehnung. Hochmolekulares naturfarbendes PE, z.B. SIMONA® PE 500 oder SIMONA® PE 1000, verhält sich geringfügig günstiger. Naturfarbendes PE ist somit für den Außeneinsatz nicht, bzw. nur bedingt geeignet. Eine ausgezeichnete UV-Stabilität und somit ein günstiges Alterungsverhalten weisen SIMONA® PE HD schwarz, SIMONA® PE 100 schwarz und SIMONA® PE-EL auf. Diese Werkstoffe sind mit Ruß stabilisiert und es liegen langjährige positive Erfahrungen bezüglich des Alterungsverhaltens vor.

Polypropylen

Naturfarbene, UV-unstabilisierte PP-Typen (SIMONA® PP-H natur) verhalten sich ähnlich wie unstabilisiertes PE. Bereits nach wenigen Monaten Außeneinsatz ist ein merklicher Abfall der mechanischen Eigenschaften zu beobachten. SIMONA® PP-H AlphaPlus® ist vor allem wärmestabilisiert und für Anwendungen bei Temperaturen bis 100 °C geeignet. Im Außeneinsatz zeigt dieser Werkstoff schon nach kurzer Zeit farbliche Veränderungen, nach ca. einem Jahr Außeneinsatz sind Auskretungen und ein teilweiser Abbau der mechanischen Eigenschaften zu beobachten. In der DVS 2210-1 ist ein Passus für einen möglichen Außeneinsatz von PP zu finden: „Sofern die Einsatzdauer der Rohrleitung aus PP im Freien auf < 10 Jahre begrenzt ist, kann die unter UV-Strahlung eingesetzte Bildung einer Oxidschicht durch einen rechnerischen Wanddickenzuschlag aufgefangen werden. Der Wanddickenzuschlag ist in Abhängigkeit der

UV-Strahlungsintensität und UV-Belastungsdauer mit $\geq 2\text{mm}$ festzulegen.“ Rußstabilisierte PP-Typen, wie z.B. SIMONA® PP-EL, weisen ein günstiges Alterungsverhalten bei Außeneinsatz auf. Aufgrund dieser Stabilisierung liegt die Festigkeit des unbewitterten Materials jedoch tiefer als bei SIMONA® PP-H AlphaPlus® und SIMONA® PP-H natur.

Polyvinylchlorid

Generell gehört PVC in unstabilisiertem Zustand ebenfalls zu den mäßig beständigen Kunststoffen. Schon nach einjähriger Bewitterungszeit sind eine merkliche Vergilbung und ein Abfall der Schlagzähigkeit festzustellen. Der Standardwerkstoff für den chemischen Apparatebau, SIMONA® PVC-CAW, ist nur in weißer (eventuell auch in hellgrauer und elfenbeinfarbener) Einstellung für den längeren Außeneinsatz geeignet. Alle anderen Farbeinstellungen, wie z.B. dunkelgrau, absorbieren das Sonnenlicht sehr stark und können sich über die Grenztemperatur von 60 °C hinaus erwärmen. Somit stellt hier insbesondere die Wärmeformbeständigkeit ein Problem dar. Für einen langjährigen Außeneinsatz ist vor allem SIMONA® PVC-MZ COLOR zu empfehlen.

Polyvinylidenfluorid

Der Werkstoff PVDF hat eine sehr gute Alterungsbeständigkeit. Es bestehen sowohl für die naturfarbene Type SIMONA® PVDF als auch für SIMONA® PVDF-EL keine Bedenken für den langjährigen Außeneinsatz.

Ethylenchlorotrifluorethylen

ECTFE gehört ebenso wie PVDF zu den Fluorkunststoffen und weist daher eine gute Widerstandsfähigkeit gegenüber UV-Strahlen auf. Deshalb kann SIMONA® ECTFE auch für langjährige Anwendungen im Außenbereich empfohlen werden.

10 Rechtliche Hinweise und Beratung

Rechtliche Hinweise

Mit Erscheinen einer neuen Ausgabe verlieren frühere Ausgaben ihre Gültigkeit. Die maßgebliche Version dieser Publikation finden Sie auf unserer Website www.simona.de.

Alle Angaben in dieser Publikation entsprechen dem aktuellen Stand unserer Kenntnisse zum Erscheinungsdatum und sollen über unsere Produkte und mögliche Anwendungen informieren (Irrtum und Druckfehler vorbehalten). Es erfolgt somit keine rechtlich verbindliche Zusicherung von bestimmten Eigenschaften der Produkte oder deren Eignung für einen konkreten Einsatzzweck.

Die einwandfreie Qualität unserer Produkte gewährleisten wir ausschließlich im Rahmen unserer Allgemeinen Geschäftsbedingungen und im dort genannten Umfang.

Für Anwendungen, Verwendungen, Verarbeitungen oder den sonstigen Gebrauch dieser Informationen oder unserer Produkte sowie die sich daraus ergebenden Folgen übernehmen wir keine Haftung. Der Käufer ist verpflichtet, die Qualität sowie die Eigenschaften der Produkte zu kontrollieren. Er übernimmt die volle Verantwortung für Auswahl, Anwendung, Verwendung und Verarbeitung der Produkte und den Gebrauch der Informationen sowie die Folgen daraus. Etwa bestehende Schutzrechte Dritter sind zu berücksichtigen.

Beratung

Unsere anwendungstechnische Beratung erfolgt nach bestem Wissen und basiert auf Ihren Angaben sowie dem uns aktuell bekannten Stand der Technik. Die Beratung stellt keine Zusicherung von bestimmten Eigenschaften dar und begründet kein selbstständiges, vertragliches Rechtsverhältnis.

Wir haften nur für Vorsatz oder grobe Fahrlässigkeit, in keinem Fall aber für die Richtigkeit und Vollständigkeit Ihrer Angaben sowie der hierauf basierenden Ergebnisse unserer Beratung. Unsere Angaben entbinden Sie nicht von der Pflicht der eigenen Prüfung.

Änderungen aufgrund neuer Erkenntnisse und Bewertungen bleiben vorbehalten.

Unsere Mitarbeiter in Verkauf und Technical Service Center beraten Sie gerne zur Verarbeitung und dem Einsatz von thermoplastischen Halbzeugen.

Phone +49 (0) 67 52 14-587

Fax +49 (0) 67 52 14-302

tsc@simona.de

11 Abbildungs-, Tabellen- und Literaturverzeichnis

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Strukturmodell eines amorphen Thermoplasts	9
Abbildung 2:	Strukturmodell eines teilkristallinen Thermoplasts	9
Abbildung 3:	Mechanische Eigenschaften amorpher Thermoplaste	12
Abbildung 4:	Mechanische Eigenschaften teilkristalliner Thermoplaste	13
Abbildung 5:	Strukturmodell eines Duroplasts	14
Abbildung 6:	Additionsreaktion eines Epoxids	15
Abbildung 7:	Syntheschema einer Methylenphenolgruppe als Strukturelement bei einem klassischen Phenoplast aus Phenol und Formaldehyd	16
Abbildung 8:	Verschiedene schematische Darstellungsweisen für Polyethylen	17
Abbildung 9:	PE hoher Dichte	17
Abbildung 10:	PE niedriger Dichte	17
Abbildung 11:	Schematische Darstellung der Eigenschaften von PE-HD in Abhängigkeit von der Molekülkettenlänge	18
Abbildung 12:	Schematische Darstellung von PP	18
Abbildung 13:	Schematische Darstellung eines isotaktischen PP	18
Abbildung 14:	Schematische Darstellung eines syndiotaktischen PP	18
Abbildung 15:	Schematische Darstellung eines ataktischen PP	19
Abbildung 16:	Schematische Darstellung von PVC-U	20
Abbildung 17:	Schematische Darstellung von PVDF	21
Abbildung 18:	Schematische Darstellung von ECTFE	22
Abbildung 19:	Schematische Darstellung von ETFE	23
Abbildung 20:	Schematische Darstellung von PFA	23
Abbildung 21:	Schematische Darstellung von PETG	24
Abbildung 22:	Schematische Darstellung von PLA	24
Abbildung 23:	Durch Wasserstoffbrücken vernetzte Polyamide; a) Polyamid 4.6; b) Poly(p-phenylenterephthalamid) (PPTA)	25
Abbildung 24:	Schematische Darstellung von PMMA	25
Abbildung 25:	Schematische Darstellung von PC aus Phosgen und Bisphenol A	26
Abbildung 26:	Spannungs-Dehnungs-Diagramm	34
Abbildung 27:	Funktionsprinzip des Scherversuchs	35
Abbildung 28:	Mechanische Modelle des viskoelastischen Körpers	35
Abbildung 29:	Spannungsrelaxation	36
Abbildung 30:	Kriechen und Kriecherholung	36
Abbildung 31:	Änderung des spezifischen Volumens mit der Temperatur	38

Abbildung 32:	Schematische Darstellung einer Spannungs-Dehnungs- kurve eines teilkristallinen Thermoplasts	40
Abbildung 33:	Spannungs-Dehnungskurve mit Zugfestigkeit σ_s , Reißfestigkeit σ_b und den dazugehörigen Dehnungen für amorphe Thermoplaste	40
Abbildung 34:	Kurzzeit-Elastizitäts-Modul von SIMONA® Thermoplasten in Abhängigkeit von der Temperatur	41
Abbildung 35:	Schematischer Aufbau des Dreipunkt- und Vierpunkt-Biegeversuchs	42
Abbildung 36:	Der Torsionsschwingversuch	43
Abbildung 37:	Gedämpfte Schwingung	44
Abbildung 38:	Der Ringscherversuch	45
Abbildung 39:	Der Segmentscherversuch	45
Abbildung 40:	Probenanordnung zur Messung der Haftfestigkeit (Probekörper Form A)	46
Abbildung 41:	Schlagbiegeversuch nach Charpy	46
Abbildung 42:	Kerbschlagzähigkeit als Funktion der Temperatur	47
Abbildung 43:	Prinzipieller Aufbau des Sand-Slurry-Tests	50
Abbildung 44:	Relativer Verschleiß von Thermoplasten als Funktion der Temperatur	51
Abbildung 45:	Linearer thermischer Ausdehnungskoeffizient als Funktion der Temperatur einiger Thermoplaste	54
Abbildung 46:	Schematische Darstellung des SBI-Tests	57
Abbildung 47:	Kondensatoranordnung mit Polarisationsladungen; a) ohne Dielektrikum; b) mit Dielektrikum	63
Abbildung 48:	Kriechmodul von PE 100 für 25 Jahre	70
Abbildung 49:	Zeitstandkurve PE 100	72
Abbildung 50:	Arbeiten mit der Zeitstandkurve	73
Abbildung 51:	Isochrones-Spannungs-Dehnungs-Diagramm von PE 100 für 23 °C	74
Abbildung 52:	Relaxations- und Retardationsschnitte im isochronen Spannungs-Dehnungsschaubild in schematischer Darstellung	74
Abbildung 53:	Spannungsorientierungen	77
Abbildung 54:	Abhängigkeit des spezifischen Volumens von der Temperatur; links: amorphe Thermoplaste; rechts: teilkristalline Thermoplaste	78
Abbildung 55:	Spannungsverlauf bei Wechseltemperaturen	81
Abbildung 56:	Theoretische Betrachtung der gleichförmigen Spannungsverteilung	85
Abbildung 57:	Spannungsverteilung an gekerbten Proben	86
Abbildung 58:	Schweißnahtfestigkeit als Funktion der Schweißnahtlage bei Eckverbindungen	88

Abbildung 59:	Schweißnahtfestigkeit als Funktion der Schweißnahtlage bei T-förmigen Verbindungen	89
Abbildung 60:	Verbindung von Platten in einer Ebene	89
Abbildung 61:	Einfluss der Schweißnaht bei Querschnittsänderung	89
Abbildung 62:	Eckengestaltung	90
Abbildung 63:	Schweißnahtanhäufungen	90
Abbildung 64:	Verlauf der Schweißspannungen über die Länge der Schweißnaht beim Heizelementstumpf- und Wärmgasschweißen (nach Menges)	91
Abbildung 65:	Verlauf der Schweißspannungen über dem Schnitt senkrecht zur Schweißnaht. Die Höhe der Querspannungen bei der Heizelementstumpfnahht ist stark von der Höhe und Dauer des Schweißdruckes abhängig (nach Menges)	92
Abbildung 66:	Rissbildung in einem Kunststoff	93

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Auswahl an Thermoplasten und die (möglichen) zugehörigen Monomere	10
Tabelle 2:	Kenndaten von PE	17
Tabelle 3:	Molekulargewicht in g/mol	17
Tabelle 4:	Eigenschaften unterschiedlicher Thermoplaste	23
Tabelle 5:	Mechanische Eigenschaften einiger Thermoplaste	39
Tabelle 6:	Wärmeleitfähigkeit λ einiger Werkstoffe	52
Tabelle 7:	Mittlerer thermischer Ausdehnungskoeffizient einiger Werkstoffe	54
Tabelle 8:	Beurteilung des Brandverhaltens	56
Tabelle 9:	Strahlenbeständigkeit	69
Tabelle 10:	Eigenschaftsvergleich von gepressten und extrudierten Platten	94
Tabelle 11:	Tolerierbare Randfaserdehnung	95
Tabelle 12:	Kaltbiegeradien für PE 100	96

Literaturverzeichnis

- Wolfgang Retting: Mechanik der Kunststoffe, Hanser Verlag
- Saechtling: Kunststoffhandbuch, Hanser Verlag
- Stephan/Maying: Thermodynamik, Springer Verlag
- Michaeli/Brinkmann/Lessenich-Henkys: Kunststoffbauteile werkstoffgerecht konstruieren, Hanser Verlag
- KRV: Kunststoffrohrhandbuch, Vulkan Verlag Essen
- Menges: Werkstoffkunde Kunststoffe, Hanser Verlag
- Ehrenstein: Mit Kunststoffen konstruieren, Hanser Verlag
- Frank/Biederbrink: Kunststoff-Kompendium, Vogel-Verlag
- Lechner, Gehrke, Nordmeier: Makromolekulare Chemie, Birkhäuser Verlag, 3. Auflage, 2003
- DVS Taschenbuch „Fügen von Kunststoffen“

Autoren

Konstantin Birt
Mathias Conrad
Dieter Eulitz
Philipp Kuhn
Dr. René Stangenberg
Marco Stallmann

Die genannten Autoren der aktuellen Ausgabe bedanken sich hiermit bei allen Kollegen, die an früheren Ausgaben des vorliegenden Dokumentes mitgearbeitet und somit das Wissensfundament für diese Ausgabe gelegt haben.

Darüber hinaus bedanken wir uns bei allen im Quellenverzeichnis genannten Werken und deren Herausgebern dafür, dass wir entsprechende Zitate übernehmen durften.

SIMONA worldwide

SIMONA AG

Teichweg 16
55606 Kirn
Germany
Phone +49 (0)67 52 14-0
Fax +49 (0)67 52 14-211
mail@simona.de
www.simona.de

PRODUCTION SITES

Plant I
Teichweg 16
55606 Kirn
Germany

Plant II
Sulzbacher Straße 77
55606 Kirn
Germany

Plant I
Gewerbestraße 1 - 2
77975 Ringsheim
Germany

SIMONA Plast-Technik s.r.o.
U Autodílen č.p. 23
43603 Litvínov-Chudeřín
Czech Republic

**SIMONA ENGINEERING PLASTICS
(Guangdong) Co. Ltd.**
No. 368 Jinou Road
High & New Technology Industrial
Development Zone
Jiangmen, Guangdong
China 529000

SIMONA AMERICA INC.
101 Power Boulevard
Archbald, PA 18403
USA

**Boltaron Inc.
A SIMONA Company**
1 General Street
Newcomerstown, OH 43832
USA

SALES OFFICES

SIMONA S.A.S. FRANCE
43, avenue de l'Europe
95330 Domont
France
Phone +33 (0)1 39 35 49 49
Fax +33 (0)1 39 91 05 58
mail@simona-fr.com
www.simona-fr.com

SIMONA UK LIMITED
Telford Drive
Brookmead Industrial Park
Stafford ST16 3ST
Great Britain
Phone +44 (0)1785 22 2444
Fax +44 (0)1785 22 2080
mail@simona-uk.com
www.simona-uk.com

SIMONA AG SWITZERLAND
Industriezone
Bäumlimattstrasse 16
4313 Möhlin
Switzerland
Phone +41 (0)61 8 559070
Fax +41 (0)61 8 559075
mail@simona-ch.com
www.simona-ch.com

**SIMONA S.r.l. SOCIETÀ
UNIPERSONALE**
Via Volontari del Sangue 54a
20093 Cologno Monzese (MI)
Italy
Phone +39 02 2 50851
Fax +39 02 2 508520
commerciale@simona-it.com
www.simona-it.com

**SIMONA IBERICA
SEMIELABORADOS S.L.**
Doctor Josep Castells, 26-30
Polígono Industrial Fonollar
08830 Sant Boi de Llobregat
Spain
Phone +34 93 635 4103
Fax +34 93 630 8890
mail@simona-es.com
www.simona-es.com

SIMONA Plast-Technik s.r.o.
Paříkova 910/11a
19000 Praha 9 - Vysočany
Czech Republic
Phone +420 236 160 701
Fax +420 476 767 313
mail@simona-cz.com
www.simona-cz.com

SIMONA POLSKA Sp. z o.o.
ul. Wroclawska 36
Wojkowice k / Wrocławia
55-020 Żórawina
Poland
Phone +48 (0)71 3 52 8020
Fax +48 (0)71 3 52 8140
mail@simona-pl.com
www.simona-pl.com

000 "SIMONA RUS"

Projektiருemy proezd No. 4062,
d. 6, str. 16
BC PORTPLAZA
115432 Moscow
Russian Federation
Phone +7 (499) 683 00 41
Fax +7 (499) 683 00 42
mail@simona-ru.com
www.simona-ru.com

SIMONA FAR EAST LIMITED

Room 501, 5/F
CCT Telecom Building
11 Wo Shing Street
Fo Tan, Hong Kong
China
Phone +852 29 47 0193
Fax +852 29 47 0198
sales@simona-hk.com
www.simona-cn.com

SIMONA ENGINEERING PLASTICS TRADING (Shanghai) Co. Ltd.

Room.5, 19/F, Block B
Hongqiao Nanfeng Town
No. 100 Zunyi Road
Changning District
Shanghai
China 200051
Phone +86 21 6267 0881
Fax +86 21 6267 0885
shanghai@simona-cn.com
www.simona-cn.com

SIMONA INDIA PRIVATE LIMITED

Star Hub, Unit No. 204,
2nd Floor, Building No. 1,
Sahar Road, Andheri East,
Mumbai 400099
India
Phone +91(0)22 66 197 100
Fax +91(0)22 66 197 105

SIMONA AMERICA INC.

101 Power Boulevard
Archbald, PA 18403
USA
Phone +1 866 501 2992
Fax +1 800 522 4857
mail@simona-america.com
www.simona-america.com

Boltaron Inc. A SIMONA Company

1 General Street
Newcomerstown, OH 43832
USA
Phone +1 800 342 7444
Fax +1 740 498 5448
info@boltaron.com
www.boltaron.com



SIMONA AG

Teichweg 16
55606 Kirn
Germany

Phone +49 (0) 67 52 14-0
Fax +49 (0) 67 52 14-211
mail@simona.de
www.simona.de