

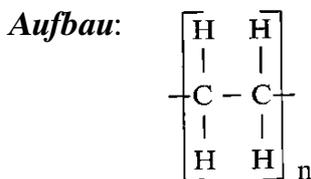
10 Thermoplaste

10.1 Polyolefine

Polyolefine sind teilkristalline Thermoplaste, die sich durch eine gute chemische Beständigkeit und gute elektrische Isoliereigenschaften auszeichnen. Da sie sich nach fast allen üblichen Verfahren leicht verarbeiten lassen und preiswert sind, finden sie eine so breite Anwendung, dass sie heute zur wichtigsten Kunststoffgruppe geworden sind.

Hauptsächlich eingesetzt werden *Polyethylen* (Kap. 10.1.1) und *Polypropylen* (Kap. 10.1.2). Für besondere Anforderungen werden *spezielle Polyolefine* (Kap. 10.1.3) verwendet. Neue Katalysatoren (*Metallocene*, Single-Site) führen bei den Polyolefinen zu speziellen Produkten, die, vor allem mit enger Molmassenverteilung, völlig neue Eigenschaftsprofile aufweisen und daher zunehmend andere Kunststoffe (vor allem solche mit ökologisch ungünstigerem Eigenschaftsprofil) ersetzen können (siehe auch Kap. 10.1.1 und 10.1.2). Homo- und Copolymere auf Ethylen(Ethen)-Basis zeigen eine große Bandbreite in ihren Eigenschaften von steif (PE-UHMW) bis sehr flexibel (EVAC). Multimodales PE-HD weist besondere Eigenschaften auf.

10.1.1 Polyethylen PE



Handelsnamen (Beispiele): Affinity, Dowlex, Elite (Dow); Ambicat, Borstar (Borealis); Bexloy, Fusabond, Surlyn, Tyvek (DuPont); Combithen (Wolff); Eraclene (Polimeri); Escor, Paxon (Exxon); Finacene (Total); Ladene, Vestolen (Sabic); Hostalen, Lucalen, Luflexen, Lupolen, Luwax Purell (Basell); Marlex (Chevron); Novex, Rigidex (BP); Orevac (Arkema); Sclair (Nova); Stamylen, Vestolen (Sabic); Uniclene (Mitsui); Vestoplast (Degussa); Vinnapas (Wacker)

Normung: DIN EN ISO 1872; DIN EN ISO 4613 (EVAC, siehe auch Kap. 14.2.4); DIN EN ISO 11542 (PE-UHMW); DIN EN 15344; DIN ISO 5834.

In DIN EN ISO 1872 werden die Polyethylen (PE-)Formmassen unterschieden durch (verschlüsselte) Wertebereiche der kennzeichnenden Eigenschaften *Dichte* ρ , *Schmelze-Massenfließrate* MFR 190/0,325 (E), MFR 190/2,16 (D), MFR 190/5 (T) oder MFR 190/21,6 (G) und Informationen über die *vorgesehene Anwendung* und/oder *Verarbeitungsverfahren, wichtige Eigenschaften, Additive, Farbstoffe, Füll- und Verstärkungsstoffe*. (MFR wird bei Überarbeitung der Normen durch MVR ersetzt).

Beispiele für die Angaben von PE-Formmassen:

Thermoplast ISO 1872 – PE,FBN,18-D045

Es bedeuten PE-Formmasse, F Folienextrusion, B Antiblockiermittel, N naturfarben, 18 Dichte 918 kg/m^3 ($0,918 \text{ g/cm}^3$) und D045 Schmelze-Massefließrate MFR 190/2,16 (D) von 3,5 g/10 min.

Thermoplast ISO 1872 – PE,B,50-G006

Es bedeuten PE-Formmasse, B Blasformen, 50 Dichte von 952 kg/m^3 ($0,952 \text{ g/cm}^3$), G006 Schmelze-Massefließrate 190/21,6 (G) von 0,5 g/10 min.

Thermoplast ISO 11542 – PE-UHMW,QD,2-2-1,ISO 5834-1

Es bedeuten PE-UHMW-Formmasse, Q Pressen, D Pulver, 2 Viskositätszahl von 2400 ml/g, Dehnspannung von 0,25 MPa, 1 Charpy-Kerbschlagzähigkeit (mit spezieller Doppel-V-Kerbe) von 150 kJ/m^2 , ISO 5834-1 zeigt, dass dieses Material für chirurgische Implantate verwendet werden kann.

Anmerkung: Bei der hier erwähnten *Dehnspannung* handelt es sich um die Zugspannung, die erforderlich ist, um die Messlänge des Probekörpers bei $150 \text{ }^\circ\text{C}$ in einer Zeitspanne von 10 Minuten um 600 % zu dehnen. Die hier erwähnte *Charpy-Kerbschlagzähigkeit* wird an einer gepressten Probe $120 \text{ mm} \times 15 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ vorgenommen; die spezielle Doppel-V-Kerbe wird mit einer Rasierklinge mit einem Kerbwinkel von $(14 \pm 2)^\circ$ eingebracht und hat eine beidseitige Tiefe von 3 mm, sodass eine Restbreite von 4 mm bestehen bleibt (siehe DIN EN ISO 11542-2).

■ Eigenschaften

Dichte: PE-LD (Low Density) verzweigt $0,914 \text{ g/cm}^3$ bis $0,94 \text{ g/cm}^3$; PE-LLD (Linear Low Density) $0,918 \text{ g/cm}^3$ bis $0,943 \text{ g/cm}^3$; PE-VLD (Very Low Density) $0,905 \text{ g/cm}^3$ bis $0,915 \text{ g/cm}^3$; PE-HD (High Density) linear $0,94 \text{ g/cm}^3$ bis $0,97 \text{ g/cm}^3$. PE-HD und PE-LD sind mischbar.

Gefüge: Unpolare, teilkristalline Thermoplaste mit unterschiedlichem Verzweigungsgrad und davon abhängiger Kristallinität von 40 % bis 55 % bei PE-LD und 60 % bis 80 % bei PE-HD. Praktisch keine Wasseraufnahme.

Verstärkungstoff: Bei PE-HD zum Teil Glasfasern.

Farbe: Ungefärbt milchig weiß, opak; nur bei sehr dünnen Folien fast glasklar. In allen Farben gedeckt einfärbbar.

Mechanische Eigenschaften: Mechanische und chemische Eigenschaften abhängig von Kristallinität (gekennzeichnet durch Dichte) und von Polymerisationsgrad (gekennzeichnet durch Schmelze-Massenfließrate MFR). Daher kann ein PE-Typ weitgehend auf die verlangten Anforderungen eingestellt werden.

Je nach Kristallinität weich bis steif. Kriechneigung vor allem bei PE-LD. Festigkeit, Zähigkeit, Elastizitätsmodul, Schlagzähigkeit sind abhängig von der Kristallinität (Dichte), siehe Tabelle 10.1.

Elektrische Eigenschaften: Ausgezeichnete elektrische Isoliereigenschaften. Dielektrische Eigenschaften fast unabhängig von Dichte, Schmelze-Massenfließ-

rate, sowie Temperatur und Frequenz. Keine HF-Erwärmung möglich. Meist starke elektrostatische Aufladung und daher Verstauben. Deshalb vielfach antistatische Ausrüstung durch Zusätze. Erhöhung der Leitfähigkeit durch 25 % bis 30 % Ruß.

Tabelle 10.1 Einfluss von Dichte und Schmelze-Massenfließrate auf die Eigenschaften von Polyethylen PE

Eigenschaft	Erhöhung der Dichte PE-LD \Rightarrow PE-HD	Verringerung der Schmelze-Massenfließrate MFR
Streckspannung	steigt stark	steigt
Elastizitätsmodul	steigt stark	steigt
Kugeldruckhärte	steigt	steigt etwas
Kristallit-Schmelztemperatur	steigt	keine wesentliche Änderung
Obere Gebrauchstemperatur	steigt	steigt etwas
Versprödungstemperatur	nimmt ab	nimmt stark ab
Schlagzähigkeit	steigt	steigt stark
Quellbarkeit	nimmt stark ab	nimmt etwas ab
Permeabilität	nimmt ab	nimmt etwas ab
Spannungsrisbildung	nimmt zu	nimmt ab
Transparenz	nimmt ab	keine Änderung
Fließfähigkeit	nimmt ab	nimmt stark ab

Thermische Eigenschaften: Obere Gebrauchstemperatur von PE-LD bei 60 °C bis 75 °C, von PE-HD bis 95 °C, kurzzeitig höher. In der Kälte Versprödung bei etwa –50 °C, bei höherer molarer Masse noch tiefer.

Kristallitschmelzpunkt T_m : PE-LD 105 °C bis 115 °C, PE-HD 125 °C bis 140 °C. Oxidationsstabilität von PE-LD besser als von PE-HD.

Brennt mit bläulicher Flamme, tropft brennend ab!

Beständig gegen (Auswahl): Verdünnte Säuren, Laugen, Salzlösungen; Wasser, Alkohol, Ester, Öle, bei PE-HD auch Benzin. Unterhalb von 60 °C in fast allen organischen Lösungsmitteln praktisch unlöslich.

Nicht beständig gegen (Auswahl): Starke Oxidationsmittel, insbesondere in der Wärme. Quellung in aliphatischen und aromatischen Kohlenwasserstoffen bei PE-LD. *Gasdurchlässigkeit* für Sauerstoff und viele Geruchs- und Aromastoffe größer als bei vielen anderen Kunststoffen.

Sehr geringe Wasserdampfdurchlässigkeit.

Bei direkter Sonnenbestrahlung Versprödung; Verhinderung durch Beimischung von 2 % bis 2,5 % Ruß; wichtig für Verwendung von PE im Freien.

Physiologisches Verhalten: Geruchlos, geschmacksfrei und physiologisch indifferent. Für Kontakte mit Lebensmitteln meist zugelassen.

Spannungsrisssbildung: Spannungsrisssbildung tritt auf insbesondere mit oberflächenaktiven Substanzen (Waschmittel, Emulgatoren). Gefahr nimmt ab mit abnehmender Dichte und abnehmender Schmelze-Massenfließrate (zunehmender Molekülkettenlänge). Spannungsrisssbeständige Typen enthalten Zusätze von Polyisobutylen.

■ Verarbeitung

Spritzgießen: Zum Spritzgießen werden Formmassen mit gutem Fließvermögen (hohe Schmelze-Massenfließrate MFR) verwendet. Das Verhältnis der amorphen zu den kristallinen Anteilen im Endgefüge wird durch die Abkühlung der Schmelze (Werkzeugtemperatur) stark beeinflusst, was sich auf Schwindung und Nachschwindung auswirkt.

Massetemperaturen je nach Type und Formteil 160 °C (PE-LD) bis 300 °C (PE-HD); Werkzeugtemperaturen 10 °C bis 80 °C, obere Grenze für höhere Kristallisationsanteile und besseren Oberflächenglanz.

Verarbeitungsschwindigkeit je nach Verarbeitungsparametern bei PE-LD 1,5 % bis 3,5 %, bei PE-HD bis 5 %.

Spritzdrücke für PE-LD 400 bar bis 800 bar, für PE-HD 600 bar bis 1200 bar, Spezialtypen aus PE-UHMW erfordern sehr hohe Spritzdrücke.

Extrudieren: Im Allgemeinen werden höhermolekulare Typen verwendet mit niedriger Schmelze-Massenfließrate MFR zwischen 0,2 g/10 min bis 4 g/10 min. Massetemperaturen je nach Sorte 190 °C bis 250 °C; bei Drahtummantelungen und für die Herstellung von Monofilen bis 300 °C.

Extrusionsbeschichtung im Verpackungssektor für Pappe, Papier und Aluminium.

Extrusionsblasen: Höhermolekulare Typen besonders gut geeignet. Massetemperaturen 140 °C bis 220 °C je nach Type; Werkzeugtemperatur 5 °C bis 40 °C. Bei PE-LD ermöglichen hohe Massetemperaturen und schnelle Abkühlung die Herstellung von hochtransparenten Hohlkörpern.

Warmumformen: Bei Temperaturen von 130 °C bis 150 °C (PE-LD) bzw. 170 °C bis 180 °C (PE-HD) meist im Negativverfahren; Werkzeugtemperaturen 40 °C bis 90 °C. Platten aus PE-LD hängen infolge niedriger Warmfestigkeit stark durch, daher Stützluft erforderlich.

Kleben: Da PE unpolar, keine hohe Klebfestigkeit möglich. Zweckmäßig ist Vorbehandlung der Klebflächen durch Abflammen, Tauchen in Chromschwefelsäurebad oder Einwirken elektrischer Oberflächenentladungen. Kleben mit Haftklebstoff, Schmelzklebstoff, Kontaktklebstoff (PUR, synthetischer Kautschuk), Zweikomponentenklebstoff (EP, PUR).

Schweißen: Schweißen ergibt beste Verbindungen mit Reibungs-, Warmgas- und Heizelementschweißen. Wärmeimpulsschweißen für Folien. Ultraschallschweißen nur in Sonderfällen. HF-Schweißen wegen zu geringer dielektrischer Verluste nicht möglich.

Spanen: Spanende Bearbeitung selten; ultrahochmolekulares PE-Halbzeug kann nur spanend bearbeitet werden. Spezielle Werkzeuge für Kunststoffbearbeitung zweckmäßig.

Oberflächenbehandlung: Vorbehandlung der Oberfläche durch Abflammen oder elektrische Oberflächenentladung in Vakuumkammer notwendig; anschließend sofortige Weiterverarbeitung zweckmäßig. *Bedrucken* im Siebdruck oder indirekten Buchdruck. *Lackieren* mit Zweikomponentenlacken in üblichen Auftragsverfahren. *Heißprägen* bei 110 °C bis 130 °C, für kleinere Schriften ohne Vorbehandlung der Formteile. *Metallisieren* im Hochvakuum nach Vorbehandlung durch elektrische Oberflächenentladung und anschließender Grundierung.

Wirbelsintern: Heißschmelzverfahren bei ca. 220 °C im Wirbelsintergerät mit PE-LD-Pulver. Anwendung zum Beschichten von Stahlrohren, Kühlschrankschaltern, Stühlen usw. Nur begrenzte Schichtdicken möglich.

Pressverfahren: Pressen mit Vorverdichten bei 200 °C und 20 bar bis 50 bar; langsames Abkühlen. Vorwiegend mit höchstmolekularem PE mit MFR von 0,01 g/10 min, einem in weitem Temperaturbereich sehr schlagzähen Kunststoff; nicht spannungsrisseanfällig; mit guten Reibungs- und Gleiteigenschaften für Zahnräder, Dichtungen, Filterplatten.

Rotationsformen insbesondere zur Herstellung von nahtlosen, spannungsarmen Großbehältern mit speziellen PE-Pulvern, z. B. PE-LLD. Nur begrenzte Wanddicken herstellbar.

■ Anwendungsbeispiele

Maschinen- und Fahrzeugbau: Handgriffe, Verschlussstopfen, Dichtungen, Gleitelemente, Korrosionsschutzüberzüge, Beschichtungen, Faltenbälge, Batteriekästen, Kunststoff-Kraftstoffbehälter KKB, auch mit coextrudierter Barrierschicht aus Ethylen-Vinylalkohol-Copolymeren (EVAL), Wasserbehälter, Textilspulen, Innenverkleidungen.

Elektrotechnik: Isolierung von Fernmelde- und Hochspannungskabeln, Installationsrohre, Verteilerdosen, Spulenkörper, Kabelbinder, Lüfterhauben für Elektromotoren.

Bauwesen: Trinkwasser-, Abwasserrohrleitungen, Druckrohre; Heizungsrohre, Fittings; Griffe; Eimer, Abdeckfolien, Abdichtfolien, Heizöltanks, Kunstrasen.

Transportwesen, Verpackungstechnik: Transportbehälter, Flaschenkästen, Fässer, Kanister, Verpackungsfolien, Schrumpffolien, Flaschen, Tuben, Dosen, Verschlüsse und Verschlussstopfen; Abfallbehälter, Mülltonnen, Folien, Folien für Tragetaschen, Verbund- und Verpackungsfolien, z. B. für Milch und Fruchtsäfte; Multipack-Tragegriffe. Beschichtungen für Stahlrohre.

Sonstiges: Spielzeug aller Art, Behälter im Haushalt, Siebe; Gleitbeläge für Skier, Surfbretter, Monofile für Gewebe und Seile; Sektkorken; Tintenpatronen; Kolben für Einmalspritzen, sterilbefüllbare Kleinverpackungen für Blow-fill-seal-Prozess.

Sterilisierbare Hohlkörperverpackungen. Infusionsbeutel, Inhalatoren, Mikrotiterpaletten.

■ Polyethylen-Spezialsorten

Pulverförmiges PE

PE mit besonders definierten Korngrößen wird eingesetzt z. B. für das *Rotations-schmelzen*, Wirbelsintern und für Beschichtungen.

Anwendungen: Rotationsgeformte Hohlkörper; elektrostatische oder wirbelgesinterte Beschichtungen.

PE-LLD (linear low density)

PE-LLD hat höhere Steifigkeit und Festigkeit bei gleicher Dichte als PE-LD und ist besonders geeignet für dünne, rund 5 µm dicke Blas- und Verbundfolien im Verpackungsbereich (auch Mischungen mit PE-LD); für Rotationsgieß-Formteile (große Hohlkörper wie Container, Surfbretter).

(Ultra)Hochmolekulares PE-(U)HMW

In DIN EN ISO 11542 werden PE-UHMW-Formmassen unterschieden durch (verschlüsselte) Wertebereiche der kennzeichnenden Eigenschaften *Viskositätszahl*, *Dehnspannung* und *Charpy-(Kerb)schlagzähigkeit* und Informationen über die *vorgesehene Anwendung* und/oder *Verarbeitungsverfahren*, *wichtige Eigenschaften*, *Additive* und *Farbstoffe*. *Beispiel* für die Angabe einer PE-UHMW-Formmasse siehe unter Normung.

Hochmolekulares PE-HD-HMW, sowie ultrahochmolekulares PE-HD-UHMW werden eingesetzt für *Spezialzwecke* (z. B. Prothesen, Implantate), Lager, Zahnräder, Dichtungen, Manschetten, Gleitbeläge, Laufrollen, verschleißfeste Auskleidungen. Sie zeichnen sich aus durch ungewöhnlich hohe Schlag- und Kerbschlagzähigkeit, sowie sehr günstiges Reibungs- und Verschleißverhalten.

Verarbeitung des pulverförmigen Ausgangsmaterials durch Pressen zu Halbzeug, das nur spanend weiterverarbeitet werden kann.

Vernetztes Polyethylen PE-X

PE-HD kann nach dem Spritzgießen durch Peroxid im Werkzeug bei 200 °C bis 230 °C oder durch energiereiche Strahlung vernetzt werden.

Eigenschaften: Durch Vernetzung Erhöhung von Zeitstandfestigkeit, Schlagzähigkeit in der Kälte und Spannungsrißbeständigkeit. Kurzzeitige Gebrauchstemperaturen bis 200 °C. Bei hohen Temperaturen wegen der Vernetzung nur gummielastisches Erweichen. *Anwendung:* Formteile im Apparate- und Automobilbau, Elektrotechnik; Rohre für Warmwasser-, Fußboden- und Fernwärmeheizungen, Stahlrohrbeschichtungen Medizintechnik.

PE-LD kann nach dem Extrudieren kontinuierlich durch energiereiche Strahlung vernetzt werden. *Anwendung:* Heißwasserleitungen, Leitungen für Fußbodenheizungen, Ummantelungen für Hochspannungskabel. Schrumpfelemente.

Abbaubares PE

Compounds auf der Basis PE mit ca. 6 % abbaubaren Polymeren (z. B. Stärke, Polysaccharide) sind biologisch abbaubar (siehe Kap. 16.3).

Ethylen-Vinylacetat Formmassen EVAC

EVAC-Formmassen sind genormt in DIN EN ISO 4613 (siehe Kap. 14.2.4). Eigenschaftsänderung erfolgt durch Copolymerisation von Ethylen (E) mit Vinylace-

Tabelle 10.2 Eigenschaften von COC-Polymeren Topas (Topas)

Eigenschaft	Prüfnorm	Einheit	Kennwertbereich
Dichte	ISO 1183	g/cm ³	1,02
Zugfestigkeit σ_M	DIN EN ISO 527	MPa	66
Dehnung bei Zugfestigkeit ϵ_M	DIN EN ISO 527	%	3 bis 10
E-Modul E_t	DIN EN ISO 527	MPa	2600 bis 3200
Charpyschlagzähigkeit a_{cU}	DIN EN ISO 179/1eU	kJ/m ²	13 bis 15
Charpy-Kerbschlagzähigkeit a_{cN}	DIN EN ISO 179/1eA	kJ/m ²	1,7 bis 2,6
Kugeldruckhärte H961/30	DIN ISO 2039-1	N/mm ²	130 bis 190
Wärmeformbeständigkeits-temperatur T_f	DIN EN ISO 75	°C	75 bis 170
Thermischer Längenausdehnungskoeffizient α	DIN 53752	K ⁻¹	(0,6 bis 0,7) · 10 ⁻⁴
Dielektrizitätszahl 1 bis 10 kHz	IEC 60250	–	2,35
Spezifischer Durchgangswiderstand	IEC 60093	Ωcm	<10 ¹⁶
Kriechwegbildung CTI	IEC 60112	–	<600
Wasseraufnahme (24 h/Wasser 23 °C)	DIN EN ISO 62	%	<0,01
Wasserdampfdurchlässigkeit	DIN 53122	g/(m ² ·d)	0,023 bis 0,045
Verarbeitungsschwindigkeit	DIN EN ISO 294-4	%	0,6 bis 0,7

tat (VAC). Mit zunehmendem VAC-Gehalt werden die Formstoffe flexibler bis sogar ausgeprägte Kautschukeigenschaften vorliegen. Mit zunehmendem VAC-Gehalt *steigen* Zähigkeit in der Kälte, Temperaturschockfestigkeit, Flexibilität, Spannungsrissbeständigkeit, Transparenz, Witterungsbeständigkeit und Klebrigkeit; *es nehmen dagegen ab* Härte, Steifigkeit, Schmelzpunkt, Beständigkeit, Streckspannung und Formbeständigkeit in der Wärme.

Handelsnamen: Baymod L, Levapren (Lanxess); Elvax (DuPont); Evatane (Arkema); Greenflex (Polimeri); Ultrathene (Basell).

Anwendungsbeispiele:

EVAC mit VAC-Gehalt 1 bis 10 %: Beutel, Tiefkühlverpackungen, Verbundfolien.

EVAC mit VAC-Gehalt 10 % bis 30 %: ähnlich wie Weich-PVC (PCV-P), z. B. Dichtungen, rußgefüllte Kabelummantelungen.

EVAC mit VAC-Gehalt 30 % bis 40%: Klebstoffe und Beschichtungen.

EVAC mit VAC-Gehalt 40 % bis 50 %: Kabelummantelungen, Formteile und Folien höherer Zähigkeit; Schmelzklebstoffe; Zugabe für hochschlagzähes PVC (PVC-HI).

PE, hergestellt mit Single-site bzw. Metallocenkatalysatoren (PE-M)

Copolymere des Ethylens mit α -Olefinen ergeben Polymere (z. B. Luflexen von Basell) mit sehr enger Molmassenverteilung und dabei sehr günstigen optischen Eigenschaften bei hoher Zähigkeit und geringer Dichte zwischen $0,903 \text{ g/cm}^3$ und $0,917 \text{ g/cm}^3$. Durch geringe extrahierbare Bestandteile eignen sich solche Kunststoffe für den Einsatz im Lebensmittel- und medizinischen Bereich. Weitere *Anwendungen* als gut schweiß- und siegelbare, zähe und glasklare Ein- oder Mehrschichtfolien im Verpackungsbereich im Austausch zu Ionomeren; außerdem für Formteile und Behälter in der Medizintechnik (Ampullen, Katheder). Vernetzte Sorten finden Einsatz für Kabelummantelungen.

Cycloolefin-Copolymere (COC) mit Ethen sind sehr lösemittel- und chemikalienbeständig und weisen hohe Einsatztemperaturen auf (Wärmeformbeständigkeitstemperaturen bis $170 \text{ }^\circ\text{C}$), Tabelle 10.2. Bei Cycloolefingehalten von über 10 % gehen diese Produkte vom teilkristallinen in den amorphen, glasklaren Zustand über. Der neue Kunststoff Topas (Thermoplastic Olefin Polymer of Amorphous Structure) von Topas kann z. B. für die Herstellung von CDs und CD-ROMs eingesetzt werden; bei geringerer Dichte gegenüber Polycarbonat PC lassen sich mehr Daten bei geringerem Signalrauschen speichern, weil eine extrem niedrige optische Doppelbrechung vorliegt. Weitere Anwendungsgebiete sind optische Linsen, Brillen, transparente Sichtscheiben; Teile für die Medizintechnik, die durch Heißdampf und Gammastrahlen sterilisiert werden können; Folien für Verpackungszwecke; Bauteile für Haushaltsartikel, Elektrotechnik und Beleuchtung.

Multimodales PE-HD

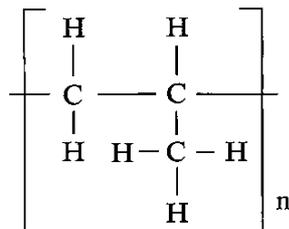
Multimodale PE-HD-Produkte (Copolymere aus PE-HD und 1-Buten oder 1-Hexen) zeichnen sich durch eine spezielle Molmassenverteilung aus. Die Produkte

bestehen aus kurzkettingen, niedermolekularen, hauptsächlich kristallinen Anteilen und langkettingen, hochmolekularen, amorphen Anteilen. Die langen Kettenmoleküle verknüpfen die kristallinen Anteile zu einem Produkte mit höherer Dichte als vergleichbares *unimodulares* PE-HD. Dadurch ergeben sich außergewöhnliche Werkstoff- und Fertigteileigenschaften mit hoher Steifigkeit und vorher nicht erreichter Zähigkeit. Diese multimodalen PE-HD-Werkstoffe eignen sich insbesondere für erdverlegte Versorgungsleitungen, für Gas und Trinkwasser, sowie den Abwasserbereich, auch wenn geringe Rissanfälligkeit gefordert ist.

Multimodales Hochleistungs-Polyethylen Hostalen ACP (Advanced Cascade Process) besteht aus drei unterschiedlichen Polymerfraktionen, die sehr homogen vermischt sind. Eingesetzt wird dieses PE-HD für Folien, blasgeformte Behälter und extrudierte Rohre. Bei gutem Verarbeitungsverhalten zeichnet sich das Produkt aus durch günstige mechanische Eigenschaften, besonders gute Steifigkeit, Dichte und Spannungsrissbeständigkeit; die Wanddicken lassen sich reduzieren.

10.1.2 Polypropylen PP

Aufbau:



Handelsnamen (Beispiele):

Acclear, Accpro, Acctuf, Amtuf (BP); Achieve (Exxon); Adflex, Adstif, Hostacom, Metocene, Moplen, Profax (Basell); Akrolen (Akro); Bergaprop (Bergmann); Borsoft, Daplen (Borealis); Carpoprene (P-Group); Eltex (Solvay); Escorene (Exxon); Inspire (Dow); Ladene, Stamylan, Vestolen (Sabic).

Normung: DIN EN ISO 1873.

In DIN EN ISO 1873 werden die Polypropylen (PP-)Formmassen unterschieden durch (verschlüsselte) Wertebereiche der kennzeichnenden Eigenschaften, *Zug-Modul*, *Charpy-Kerbschlagzähigkeit*, *Schmelze-Massenfließrate* MFR 230/2,16 und Informationen über grundlegende *Polymer-Parameter*, die *vorgesehene Anwendung* und/oder *Verarbeitungsverfahren*, *wichtige Eigenschaften*, *Additive*, *Farbstoffe*, *Füll- und Verstärkungsstoffe*. (MFR wird bei Überarbeitung der Normen durch MVR ersetzt).

Zusätzliche Unterscheidung von PP-Formmassen:

- H Homopolymerisate des Propylens
- B Thermoplastisches, schlagzähes Polypropylen, bestehend aus zwei oder mehr Phasen aus einem Homopolymer H oder statistischem Copolymer R (Randomcopolymer) als Matrix und einer Kautschukphase, die sich aus

Propylen und einem anderen Polyolefin (oder Olefinen) ohne funktionelle Gruppen zusammensetzt. Die Kautschukphase kann in situ erzeugt oder der Polypropylenmatrix physikalisch beigemischt werden (früher als „Block-Copolymer“ bezeichnet)

- R Thermoplastische, *statistische* Copolymerisate des Propylens mit einem oder mehreren aliphatischen Olefinen ohne funktionelle Gruppen, außer der olefinischen Gruppe
- PCT *Randomcopolymer*e mit modifizierter Kristallinität und erhöhter Temperaturbeständigkeit (z. B. für Rohre).

Beispiel für die Angabe einer PP-Formmasse:

Thermoplast ISO 1873 – PP-B,EC,10-09-012

Es bedeuten schlagzähe PP-B-Formmasse, E Extrusion, C mit Farbmittel, 10 Zug-E-Modul von 1100 MPa, 09 Charpy-Kerbschlagzähigkeit 7 kJ/m² und 012 Schmelze-Massefließrate MFR 230/2,16 von 0,9 g/10 min.

Metallocenkatalysatoren erlauben bei Polypropylen Sorten mit neuen Eigenschaftskombinationen (PP-M), die andere technische Kunststoffe substituieren können. Bei Fasern aus PP führen Metallocenkatalysatoren zu feineren Titern, höherer Faserfestigkeit, besserem Rückstellverhalten und besserer Anfärbbarkeit. Durch geeignete Nukleierungsmittel hergestelltes hochsteifes, ungefülltes PP (z. B. Stamytec von Sabic) steht in Konkurrenz zu talkumgefülltem PP bei geringerer Dichte; weich-zähe Randomblockcopolymerer konkurrieren mit TPO, TPU, EVAC, PVC-P und anderen. Im Verpackungssektor sind Produkte interessant, die hohe Steifigkeit mit erhöhter Zähigkeit kombinieren (hochkristalline Blockcopolymerer); es lassen sich dadurch die Wanddicken von Verpackungsbechern reduzieren bei gleichzeitig verbesserter Zähigkeit in der Kälte. Speziell modifizierte PP-Typen kombinieren, gegenüber üblichen Randomcopolymeren, hohe Transparenz mit sehr hoher Steifigkeit und können für dünnwandige, transparente Verpackungsbecher eingesetzt werden.

■ Eigenschaften

Dichte: 0,895 g/cm³ bis 0,92 g/cm³.

Gefüge: Teilkristalline, weitgehend unpolare Thermoplaste mit Kristallinität zwischen 60% und 70%, erzielt durch überwiegend *isotaktische* Anordnung der Methylgruppen. *Nukleierungsmittel* bewirken *feinkristalline* Struktur. Copolymerisate mit Ethylen oder EPDM haben eine höhere Schlagzähigkeit (auch bei tiefen Temperaturen) und höhere Witterungsbeständigkeit. *Hochkristalline* PP-Homopolymere erreichen infolge hohem isotaktischen Anteil sehr hohe Steifigkeit.

Ataktische Anordnung führt zu annähernd durchsichtigen Formteilen (geringe Kristallinität) mit sehr guten Fließeigenschaften für dünnwandige Formteile.

Füll- und Verstärkungsstoffe: Talkum (besonders niedrige Schwindung), Holzmehl, Glasfasern, auch Langglasfasern, Glaskugeln, Glasmatten für großflächige Teile (GMT-PP: glasmattenverstärkte Thermoplaste-Polypropylen), Polyacrylnitril-

fasern, Naturfasern, Ruß. Speziell gecoatete Füllstoffe in Verbindung mit Additiven und mineralischen Füllstoffen erhöhen die Kratzfestigkeit von PP-Oberflächen.

Farbe: Ungefärbt schwach transparent bis opak; in vielen Farben gedeckt einfärbbar bei hohem Oberflächenglanz. Spezielles PP (z. B. Metocene von Lyondell-Basell) ist mit einem speziellen Additiv so ausgerüstet, dass es fast glasklar ist.

Mechanische Eigenschaften: Höhere Steifigkeit, Härte und Festigkeit, aber niedrigere Kerbschlagzähigkeit als PE. Nagelbar. Für hochbeanspruchte Konstruktionsteile Verstärkung durch Glasfasern und Mineralstoffe. Durch gezielte Verbesserung durch Modifikationen und/oder bei der Herstellung (Copolymerisation, Metallocen-Katalysatoren) lassen sich heute die vielfältigsten Eigenschaftskombinationen erreichen; steife und zähe oder durchsichtige und zähe Produkte.

Elektrische Eigenschaften: Elektrische Eigenschaften ähnlich wie bei PE. Günstige dielektrische Eigenschaften unabhängig von Frequenz, deshalb keine HF-Erwärmung möglich. Wegen hoher Isoliereigenschaften Neigung zu elektrostatischer Aufladung und Staubanziehung, deshalb vielfach antistatische Ausrüstung.

Thermische Eigenschaften: Bei hohen Temperaturen Neigung von reinem PP zu Oxidation; deshalb durchweg Stabilisierung der PP-Typen. Obere Gebrauchstemperatur an Luft bis 110 °C, bei stärker stabilisierten und verstärkten Typen noch höher, z. T. bis 150 °C und 120 °C dauernd. Versprödungstemperatur bei 0 °C, bei modifizierten Typen (z. B. mit EPDM) tiefer.

Kristallitschmelztemperatur T_m : 158 °C bis 168 °C (Random-Polymere 135 °C bis 155 °C). **Brennverhalten** ähnlich PE.

Beständig gegen (Auswahl): Wässrige Lösungen von anorganischen Salzen, schwache anorganische Säuren und Laugen, Alkohol, einige Öle. Lösungen von üblichen Waschlaugen bis 100 °C.

Nicht beständig gegen (Auswahl): Starke Oxidationsmittel. Quellung in aliphatischen und aromatischen Kohlenwasserstoffen wie Benzin, Benzol, insbesondere bei erhöhten Temperaturen. Halogenkohlenwasserstoffe. Teilweise unbeständig bei Berührung mit Kupfer!

Physiologisches Verhalten: Geruchlos, geschmacksfrei, gut haut- und schleimhautverträglich. Für viele Anwendungen im Lebensmittelsektor und in der Pharmazie geeignet; physiologisch unbedenklich.

Spannungsrisssbildung: Nur geringe Neigung zu Spannungsrisssbildung.

■ Verarbeitung

Spritzgießen: PP gut für Spritzgießen geeignet. Plastifizierleistung der Spritzgießmaschine bei PP wegen niedriger Dichte nur 70 % von PS. Verschlussdüse zweckmäßig. Massetemperaturen 200 °C bis 300 °C, meist 270 °C bis 300 °C. Spritzdrücke bis 1200 bar. Werkzeugtemperaturen 20 °C bis 100 °C; hohe Temperatur ergibt besseren Oberflächenglanz. Durch Nukleierungsmittel wird die Kristallisationsgeschwindigkeit bedeutend erhöht (Verkürzung der Zykluszeit). Möglichst lange Nachdruckzeit. Schwindung 1,0 % bis 2,5 %.

21.2 Druckversuch

Normen:

DIN EN ISO 604	Kunststoffe – Bestimmung der Druckeigenschaften
DIN EN ISO 291	Kunststoffe – Normklimate für Konditionierung und Prüfung
DIN EN ISO 293	Kunststoffe – Formgepresste Probekörper aus Thermoplasten
DIN EN ISO 294	Kunststoffe – Spritzgießen von Probekörpern aus Thermoplasten T1: Allgemeine Grundlagen, Herstellung von Vielzweckprobekörpern und Stäben T2: Kleine Zugstäbe T3: Kleine Platten T4: Bestimmung der Verarbeitungsschwindung
DIN EN ISO 295	Kunststoffe – Pressen von Probekörpern aus duroplastischen Werkstoffen
DIN EN ISO 844	Harte Schaumstoffe – Bestimmung der Druckeigenschaften
DIN EN ISO 2818	Kunststoffe – Herstellung von Probekörpern durch mechanische Bearbeitung
DIN EN ISO 3167	Kunststoffe – Vielzweckprobekörper
DIN EN ISO 14126	Faserverstärkte Kunststoffe – Bestimmung der Druckeigenschaften in der Laminatenebene
DIN 53579	Prüfung weichelastischer Schaumstoffe – Eindrückversuch an Fertigteilen
DIN 65375	Druckversuch an unidirektional verstärkten Laminaten quer zur Faserrichtung
DIN 65380	Druckversuch an unidirektional verstärkten Laminaten parallel und quer zur Faserrichtung

Kennwerte für Druckversuch an Kunststoffen nach DIN EN ISO 604

$\sigma_{(c)y}^{1)}$	Druckfließspannung (compressive stress at yield)
ϵ_{cy}	nominelle Fließstauchung (nominal compressive yield strain)
$\sigma_{(c)M}^{1)}$	Druckfestigkeit (compressive strength)
ϵ_{cM}	nominelle Stauchung bei Druckfestigkeit
$\sigma_{(c)B}^{1)}$	Druckspannung bei Bruch (compressive stress at break)
ϵ_{cB}	nominelle Stauchung bei Bruch
$\sigma_{(c)x}$	Druckspannung bei x % Stauchung
x %	x % Stauchung
E_c	Elastizitätsmodul aus dem Druckversuch

¹⁾ In DIN EN ISO 604 sind bei den Festigkeitswerten keine Indices „c“ vorgesehen, im Gegensatz zu den Dehnungen. Um Verwechslungen mit Kennwerten aus dem Zugversuch zu vermeiden, wird hier der Index „c“ in Klammer gesetzt.

Im Druckversuch werden die Werkstoffeigenschaften ermittelt bei einachsiger Druckbeanspruchung und anfangs gleichmäßiger Spannungsverteilung über den Querschnitt. Es ist versuchstechnisch dafür zu sorgen, dass keine Knickbeanspruchung auftritt. Die im Druckversuch ermittelten Kennwerte dienen zur *Kunststoffspezifikation*, zur *Qualitätskontrolle* und ggf. zur *Berechnung* kurzzeitig beanspruchter Formteile. Geprüft werden können Thermoplaste, Duroplaste und faserverstärkte Kunststoffe sowie Elastomere.

Probekörper DIN EN ISO 3167 bzw. Abschnitte davon werden hergestellt durch Spritzgießen oder Pressen (DIN EN ISO 293, DIN EN ISO 294, DIN EN ISO 295) unter festgelegten Bedingungen (vgl. die jeweiligen Formmassenormen Teile 2 bzw. Tabelle 20.2) oder spanend durch Aussägen oder Fräsen aus Halbzeugen oder Formteilen (DIN EN ISO 2818). Oberflächenfehler müssen vermieden werden.

Probekörper sollten die Form eines rechteckigen Prismas, eines Zylinders oder eines Rohres haben. Die Endflächen müssen immer exakt planparallel sein, rechtwinklig innerhalb 0,025 mm zur größten Achse; die Kanten müssen scharf sein. Die Bearbeitung der Endflächen auf einer Drehbank oder Fräsmaschine wird empfohlen.

Allgemein werden für Kunststoffe Probekörper A und B verwendet (siehe Tabelle 21.2). Die Probekörper müssen frei von Beschädigungen, Einfallstellen und sonstigen Fehlstellen sein. Bei allen Probekörpern muss Knicken ausgeschlossen sein. Zylindrische, faserverstärkte Probekörper werden zum Schutz gegen Aufplatzen an den Enden durch Kappen geschützt.

Tabelle 21.2 Abmessungen von Probekörpern für Druckversuch

Probekörper Type	zur Ermittlung von	Länge l mm	Breite b mm	Dicke d mm
A	Elastizitätsmodul	50 ± 2	$10 \pm 0,2$	$4,0 \pm 0,2$
B	Kennwerte	$10 \pm 0,2$	$10 \pm 0,2$	$4,0 \pm 0,2$

Länge, Breite und Dicke der Probekörper müssen mit einem Mikrometer mit einer Ablesegenauigkeit von 0,01 mm vermessen werden.

Geprüft werden mindestens 5 Probekörper je Entnahmerichtung und zu bestimmender Eigenschaft. Die Proben werden entweder nach Formmassenorm oder Vereinbarungen konditioniert; bei Nichtvorliegen von Vereinbarungen erfolgt die Konditionierung im Normalklima 23/50 DIN EN ISO 291.

Prüfung erfolgt auf Druckprüfmaschinen oder in Druckeinrichtungen von Universalprüfmaschinen mit Einrichtungen zur Aufnahme der Druckspannungs-Stauchungs-Diagramme (Bild 21.8) mit einstellbarer Prüfgeschwindigkeit. Zur genauen Dehnungsmessung direkt an der Probe, vor allem zur Bestimmung des Druck-

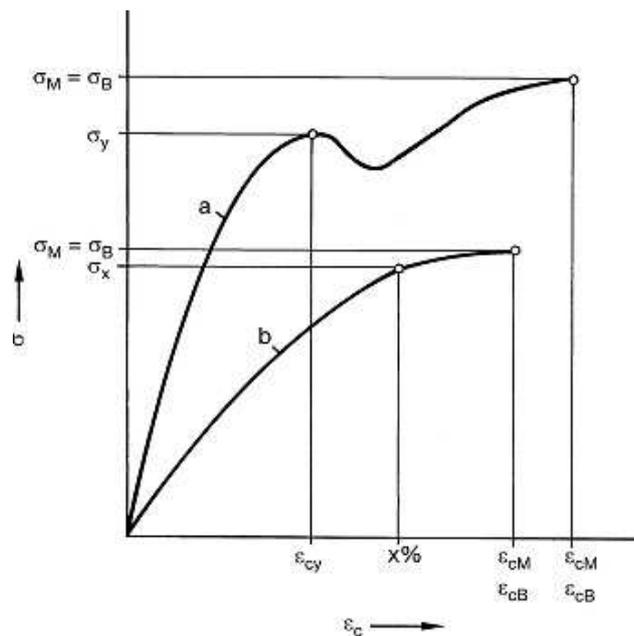


Bild 21.8 Spannungs-Stauchungs-Diagramme mit eingetragenen Kennwerten
 a) verformungsfähige Kunststoffe mit ausgeprägter Druckfließspannung
 b) Kunststoffe ohne ausgeprägte Druckfließspannung

Elastizitätsmoduls E_c , sind elektronische Ansetzdehnungsmesser oder berührungslose Dehnungsmesser notwendig und dafür die längeren Probekörper nach Tabelle 21.2 zu verwenden. Für sehr exakte Messungen wird empfohlen, die Endflächen mit einem geeigneten Schmiermittel zu schmieren, um das Rutschen zwischen den Platten zu fördern oder zwischen die Endflächen und die Druckplatten Schmirgelpapier zu legen, um das Rutschen zu vermeiden. Jede dieser Behandlungsmethoden ist im Prüfbericht anzugeben. Selbsteinstellende Druckplatten sind für manche Prüfungen empfehlenswert. Die Prüfgeschwindigkeit ist entsprechend der Erzeugnisnorm zu wählen oder entsprechend Tabelle 21.3 so, dass man am nächsten an einer der nachfolgenden Geschwindigkeiten $v = (1 \pm 0,2; 2 \pm 0,4; 5 \pm 1; 10 \pm 2; 20 \pm 2)$ mm/min liegt. Übliche Prüfgeschwindigkeiten sind ebenfalls in Tabelle 21.3 angegeben.

Der Probekörper darf nur unerheblich vorbelastet werden. Bestimmte Vorlasten sind notwendig, um einen „Durchhang“ am Beginn der Spannungs-Stauchungs-Kurve zu vermeiden.

Zur Bestimmung des Elastizitätsmoduls muss für die Anfangs-Druckspannung σ_0 gelten: $0 \leq \sigma_0 \leq 10^{-4} E_c$, das entspricht einer Vorstauchung von $\epsilon_0 \leq 0,05 \%$; zur Bestimmung der Festigkeitswerte muss gelten $0 \leq \sigma_0 \leq 10^{-2} \sigma_M$.

Auswertung erfolgt heute normalerweise über Rechnersysteme. Die Spannungs-Stauchungs-Diagramme werden auf Bildschirmen oder Plottern ausgegeben; Rechnersysteme ermitteln die entsprechenden Kennwerte und drucken ein Protokoll aus (CAT: Computer Aided Testing bzw. CAQ: Computer Aided Quality Control).

Tabelle 21.3 Prüfungsgeschwindigkeiten beim Druckversuch

Kunststoffart	Vorzugsprüfungsgeschwindigkeit mm/min	mögliche Prüfungsgeschwindigkeit in mm/min
Elastizitätsmodulbestimmung ($l = 50 \text{ mm}$)	1 mm/min	$v = 0,02 \cdot l$ (l in mm)
Kennwertbestimmung an spröden Kunststoffen ($l = 10 \text{ mm}$)	1 mm/min	$v = 0,1 \cdot l$ (l in mm)
Kennwertbestimmung an verformungsfähigen Kunststoffen ($l = 10 \text{ mm}$)	5 mm/min	$v = 0,5 \cdot l$ (l in mm)

Kennwerte: Spannungen σ in MPa
Stauchungen ε_c in %

Es gilt Spannung $\sigma = F/A$ $\varepsilon = \Delta L/L_0$ $\varepsilon_c = \Delta l/l$

ε ist die *Stauchung*, ermittelt am Probekörper als Abnahme der Messlänge ΔL bezogen auf die Ausgangslänge L_0 .

ε_c ist die *nominelle Stauchung*, ermittelt als Abnahme der Probekörperlänge Δl bezogen auf die ursprüngliche Probekörperlänge l .

Je nach Verhalten des Kunststoffs (verformungsfähig oder spröde) werden unterschiedliche Kennwerte ermittelt:

Spröde Kunststoffe

Es werden ermittelt

Druckfestigkeit $\sigma_{(c)M}$ nominelle Stauchung bei Druckfestigkeit ε_{cM}

Meistens gilt $\sigma_{(c)M} = \sigma_{(c)B}$

Verformungsfähige Kunststoffe

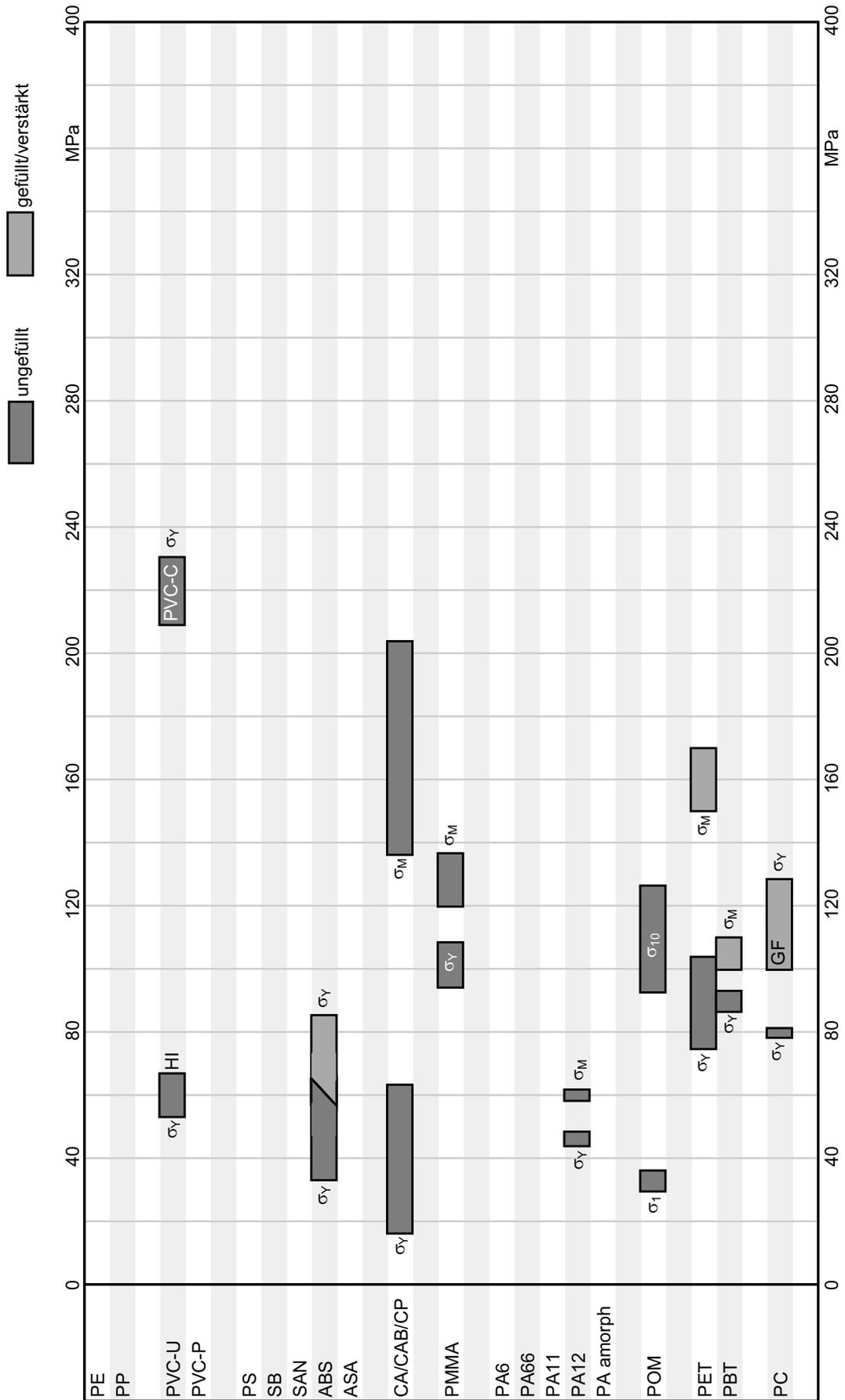
Es werden ermittelt

Druckfließspannung $\sigma_{(c)y}$ nominelle Fließstauchung ε_{cy}

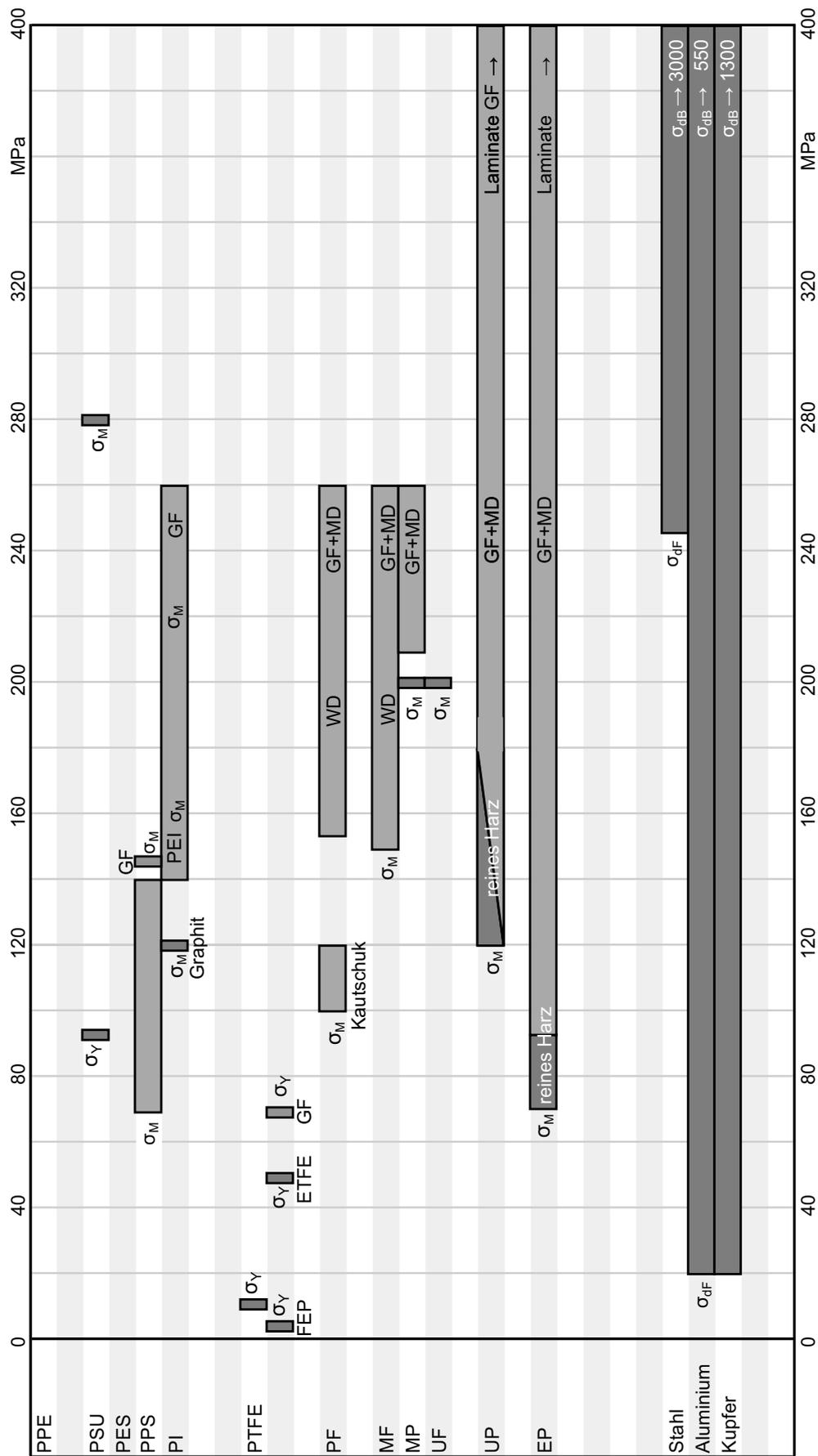
ggf. noch die Druckfestigkeit $\sigma_{(c)M}$ und die nominelle Stauchung bei Druckfestigkeit ε_{cM} . Die Druckfließspannung $\sigma_{(c)y}$ ist definiert als die Druckspannung, bei der die Steigung der Druckspannungs-Stauchungs-Kurve zum ersten mal gleich Null wird oder eine Krümmungsänderung zeigt. Wenn keine ausgeprägte Druckfließspannung auftritt, kann es zweckmäßig sein, die Druckspannung $\sigma_{(c)x}$ bei x % Stauchung zu ermitteln.

Der **Elastizitätsmodul** E_c aus dem Druckversuch wird aus messtechnischen Gründen heute meist als *Sekantenmodul* für die Dehnungsdifferenz von 0,002 (= 0,2 %) für $\varepsilon_1 = 0,0005$ (= 0,05 %) und $\varepsilon_2 = 0,0025$ (= 0,25 %) ermittelt (vgl. Bild 21.3):

$$E_c = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}$$



Druckfließspannung $\sigma_{(y)}$ /Druckfestigkeit $\sigma_{(M)}$ bei 23 °C



Druckfließspannung $\sigma_{(e)Y}$ /Druckfestigkeit $\sigma_{(e)M}$ bei 23 °C

Nach dem Versuch wird die Probe nach ihrem *Aussehen* begutachtet, wobei besonders wichtig ist, ob die Probe gebrochen ist oder nicht bzw. Anrisse an der Außenseite zeigt (Schubbrüche). Bei faserverstärkten Kunststoffen ist das Aussehen des Bruches zur Beurteilung der Bruchvorgänge in der Struktur wichtig.

Im Testbericht wird, neben den Prüf- und Vorbehandlungsbedingungen sowie statistischen Kennwerten wie Mittelwert und Standardabweichung angegeben mit welcher Probenform der Druckversuch durchgeführt wurde, z. B. Druckversuch DIN EN ISO 604/A/1, dabei bedeutet A die Probenform nach Tabelle 21.2 und 1 die Prüfgeschwindigkeit $v = 1 \text{ mm/min}$.

Anmerkungen

Nur bei einwandfrei feststellbarem Bruch der Probekörper (Schubbruch), z. B. bei spröden Kunststoffen kann man von einer Druckfestigkeit sprechen. Bei verformungsfähigen Kunststoffen sollte vorteilhaft nur die Quetschspannung oder ggf. die Druckspannung bei x % Stauchung angegeben werden; zusätzlich wird dann noch vermerkt „ohne Bruch“.

Bei der Druckprüfung längsfaserverstärkter Probekörper aus unidirektional verstärkten Laminaten kann infolge unterschiedlichen Verhaltens von Matrix (Harz) und Fasern ein Ausknicken von Faserbündeln in das brechende Harz erfolgen. In diesen Fällen ist meist die Druckfestigkeit kleiner als die Zugfestigkeit.

Bei Kunststoffen, die sich im Zuversuch spröde verhalten, kann im Druckversuch große plastische Verformbarkeit beobachtet werden, z. B. bei PMMA. Die auftretende Druck-Normalspannungskomponente senkrecht auf der Gleitebene (Bild 21.9) kann das Gleiten der Moleküle in Richtung der Schubspannungen erleichtern. Bei Zugbeanspruchung erhöht die Zug-Normalspannungskomponente senkrecht zur Gleitebene die Trenngfahr, wodurch die Bruchfahr erhöht wird.

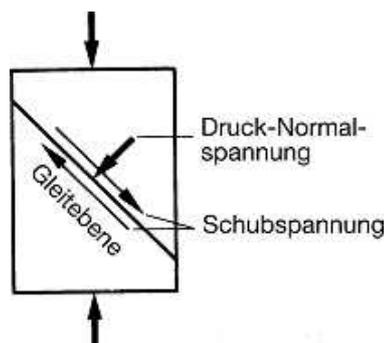


Bild 21.9 Normal- und Schubspannungen beim Druckversuch

21.3 Biegeversuch

Normen:

DIN EN ISO 178	Kunststoffe – Bestimmung der Biegeeigenschaften
DIN EN ISO 3167	Kunststoffe – Vielzweckprobekörper
DIN EN ISO 14125	Faserverstärkte Kunststoffe – Bestimmung der Biegeeigenschaften

DIN EN ISO 14130	Faserverstärkte Kunststoffe – Bestimmung der scheinbaren interlaminaren Scherfestigkeit nach dem Dreipunktverfahren mit kurzem Balken
DIN EN 12814	Prüfen von Schweißverbindungen aus thermoplastischen Kunststoffen – T1: Biegeversuch
DIN 53390	Biegeversuch an unidirektional glasfaserverstärkten Rundstablaminaten
DIN 53435	Biegeversuch und Schlagbiegeversuch an Dynstat-Probekörpern
ISO 1209	Harte Schaumstoffe – Biegeprüfungen

Kennwerte für Biegeversuch an Kunststoffen nach DIN EN ISO 178

σ_{fM}	Biegefestigkeit
ϵ_{fM}	Biegedehnung bei Biegefestigkeit
σ_{fB}	Biegespannung beim Bruch
ϵ_{fB}	Biegedehnung beim Bruch
σ_{fc}	Biegespannung bei konventioneller Durchbiegung s_c
s_c	konventionelle Durchbiegung $s_c = 1,5 \cdot h$
s	Durchbiegung
E_f	Biegemodul

Im Biegeversuch werden die Festigkeits- und Formänderungseigenschaften der Kunststoffe bei Dreipunktbiegung ermittelt. Die maximalen Beanspruchungen treten dabei in den Randschichten auf. Schubspannungen können infolge der großen Stützweite im Verhältnis zur Probendicke bei homogenen Stoffen vernachlässigt werden. Bei geschichteten oder in Längsrichtung faserverstärkten Proben können sich die Schubspannungen auf das Prüfergebnis auswirken.

Die Kennwerte dienen zur *Qualitätskontrolle*, für *Werkstoffspezifikationen* und zur *Berechnung* kurzzeitig beanspruchter Formteile. Der Biegeversuch wird durchgeführt an Thermoplasten, Duroplasten, faserverstärkten Kunststoffen (Laminaten) und harten Schaumstoffen.

Probekörper werden hergestellt durch Spritzgießen oder Pressen (DIN EN ISO 294, DIN EN ISO 295, ISO 293) unter festgelegten Bedingungen (siehe Tabelle 20.2) oder spanend durch Aussägen oder Fräsen aus Halbzeugen oder Formteilen (DIN EN ISO 2818). Sie müssen frei sein von Lunkern, Einfallstellen und Riefen. Bei Nacharbeit nur in Probenlängsrichtung bearbeiten. Es wird praktisch nur noch der Probekörper $80 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$ verwendet, auch als Abschnitt des Vielzweckprobekörpers DIN EN ISO 3167 (Tabelle 21.4) mit einer Stützweite $L = (16 \pm 1) \cdot h$. Bei Probekörpern, die aus Halbzeugen oder Formteilen entnom-

Tabelle 21.4 Abmessungen des Biegestabes

	Länge l mm	Breite b mm	Dicke h mm	Stützweite L mm
Biegestab	80 ± 2	$10,0 \pm 0,2$	$4,0 \pm 0,2$	$(16 \pm 1) \cdot h$

Tabelle 21.5 Abhängigkeit der Breite b von der Dicke h der Probekörper für die Biegeprüfung

Nennstärke h mm	Breite $b^{*)} \pm 0,5$ mm Spritzguss- und Extrusionswerkstoffe, thermoplastisch und duroplastisch
$1 < h \leq 3$	25,0
$3 < h \leq 5$	10,0
$5 < h \leq 10$	15,0
$10 < h \leq 20$	20,0
$20 < h \leq 35$	35,0
$35 < h \leq 50$	50,0

*) Probekörper mit sehr groben Füllstoffen haben eine Mindestbreite von 30 mm

men werden, gilt $l \geq (20 \pm 1) \cdot h$; die Breite b kann bei Bedarf, in Abhängigkeit von der Dicke h der Probekörper, Tabelle 21.5 entnommen werden.

Anmerkung: Für sehr dicke und unidirektional faserverstärkte Probekörper wählt man zur Vermeidung von Delamination durch Scherung $L \geq (16 \pm 1) \cdot h$ und für sehr dünne Probekörper $L \leq (16 \pm 1) \cdot h$.

Probekörper werden auf 0,1 mm genau ausgemessen, die Dicke h auf 0,01 mm. Geprüft werden mindestens fünf Probekörper bzw. bei anisotropen Kunststoffen fünf je Entnahmerichtung. Probekörper werden entweder nach Formmassenorm oder Vereinbarung konditioniert; bei Nichtvorliegen von Vereinbarungen erfolgt die Konditionierung im Normklima 23/50 DIN EN ISO 291.

Prüfung erfolgt auf speziellen Biegeprüfmaschinen oder im Biegegehänge von Universalprüfmaschinen mit Messeinrichtung für Kraft F und Durchbiegung s ; Messung erfolgt am besten elektrisch, vor allem für E-Modulbestimmung. Günstig ist die Aufnahme des Kraft-Durchbiegungs-Diagramms. Prüfung erfolgt bei Normklima 23/50 DIN EN ISO 291 oder nach Vereinbarung. Versuchsanordnung siehe Bild 21.10. Die Prüfgeschwindigkeit beträgt meist $v = (2 \pm 0,4)$ mm/min, kann aber auch zwischen 1 mm/min (für $h = 1$ mm bis $h = 3,5$ mm) und 500 mm/min variiert werden.

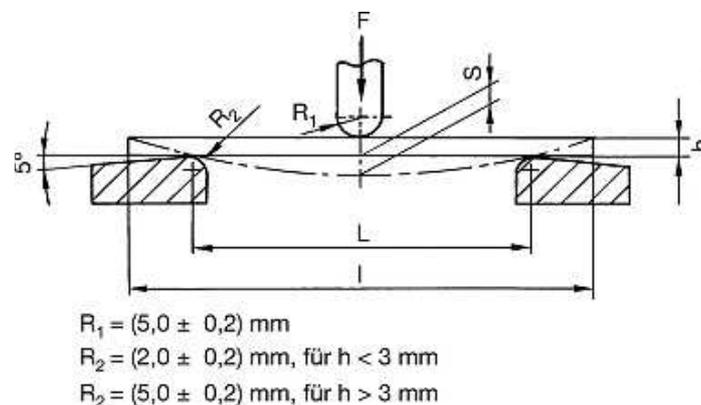


Bild 21.10 Versuchsanordnung bei Dreipunktbiegung

Der Probekörper darf nur unerheblich vorbelastet werden. Bestimmte Vorlasten sind notwendig, um einen „Durchhang“ am Beginn der Spannungs-Durchbiegungs-Kurve zu vermeiden.

Zur Bestimmung des Elastizitätsmoduls muss für die Anfangs-Biegespannung σ_{f0} gelten: $0 \leq \sigma_{f0} \leq 10^{-4} E_f$, das entspricht einer Vordehnung von $\varepsilon_{f0} \leq 0,05\%$; zur Bestimmung der Festigkeitswerte (σ_M , σ_{fC} , σ_{fB}) muss gelten $0 \leq \sigma_{f0} \leq 10^{-4} \sigma_{f(M,C,B)}$.

Auswertung erfolgt manuell oder mit automatischen Rechnersystemen

Kennwerte: Spannungen σ_f in MPa
Durchbiegungen s in mm

Bei Dreipunktbiegung und Rechteckquerschnitt der Probekörper ergibt sich in Probekörpermitte

$$\text{Biegespannung } \sigma_f = \frac{3 \cdot F \cdot L}{2 \cdot b \cdot h^2} \quad \text{Biegedehnung } \varepsilon = \frac{600 \cdot h \cdot s}{L^2} \text{ in } \%$$

konventionelle Durchbiegung $s_c = 1,5 \cdot h$

Wenn $L = 16 \cdot h$ entspricht s_c einer Randfaserdehnung von 3,5%.

Anmerkung: Probekörper, die nicht im mittleren Drittel der Stützweite L brechen, dürfen nicht ausgewertet werden.

Spröde Kunststoffe

Nach Bild 21.11, Kurve 1 ermittelt man

Biegefestigkeit σ_{fM} ($= \sigma_{fB}$)

Biegedehnung bei Biegefestigkeit ε_{fM} ($= \varepsilon_{fB}$).

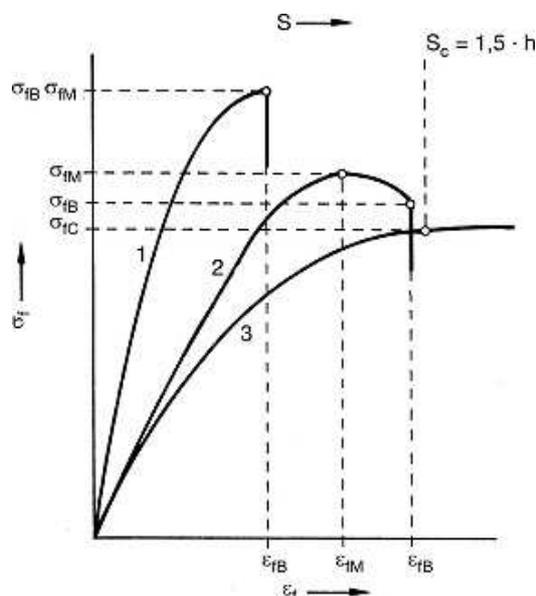
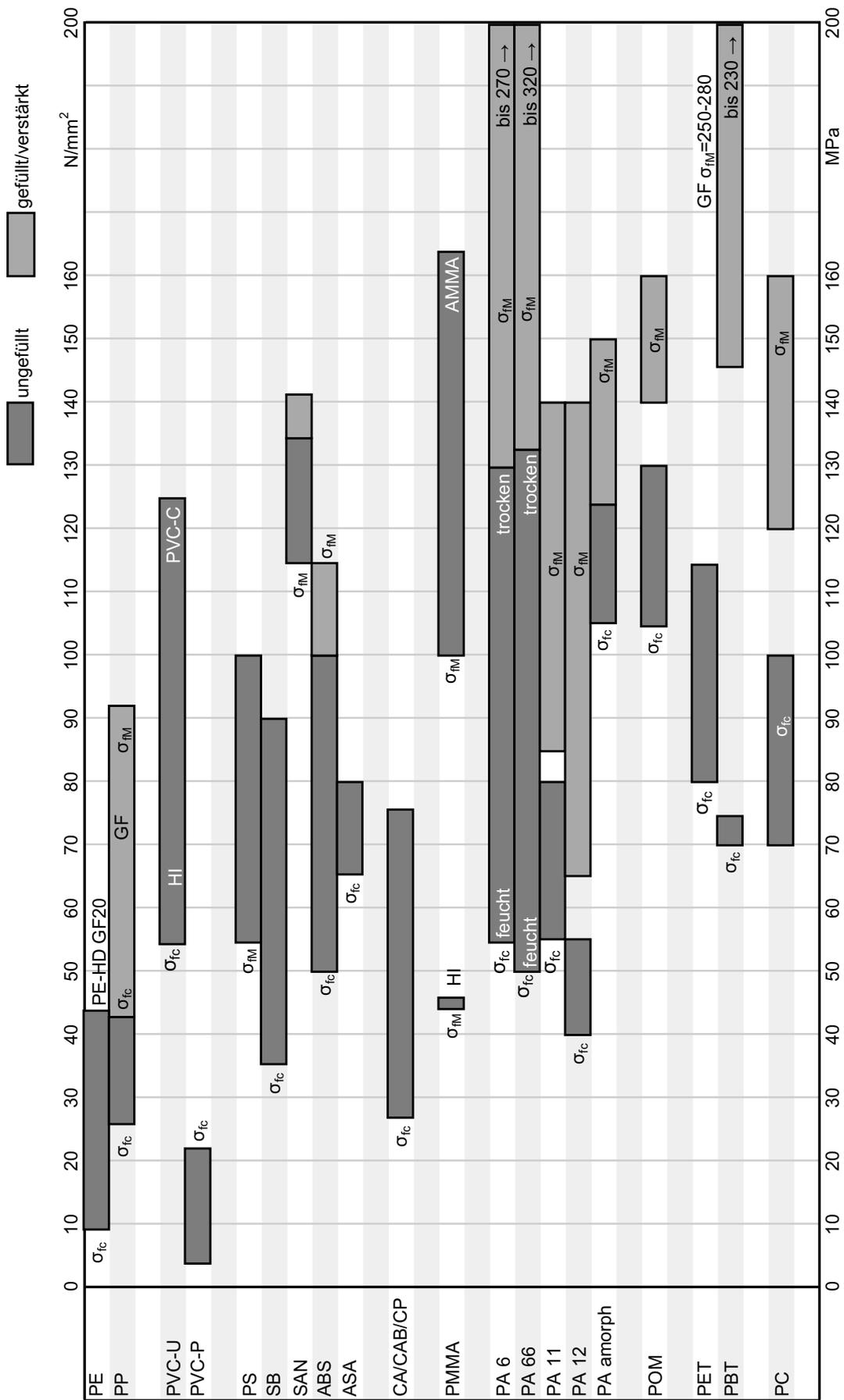


Bild 21.11 Spannungs-Dehnungs-Diagramme beim Biegeversuch

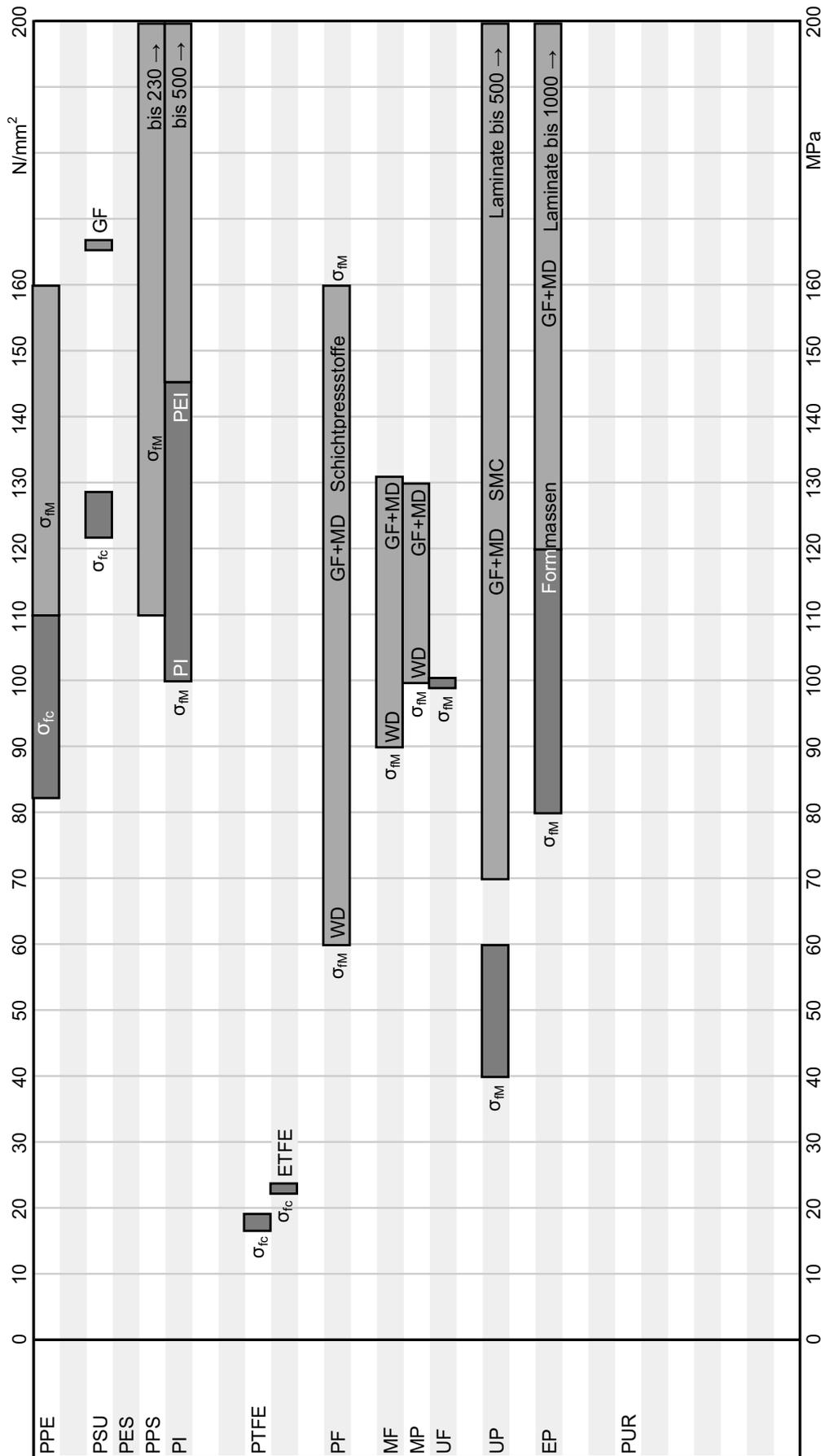
1 spröder Kunststoff

2 verformungsfähiger Kunststoff *mit* Spannungsmaximum und Bruch vor Erreichen der konventionellen Durchbiegung $s_c = 1,5 \cdot h$

3 verformungsfähiger Kunststoff *ohne* Spannungsmaximum und Bruch nach Erreichen der konventionellen Durchbiegung $s_c = 1,5 \cdot h$



Biegefestigkeit σ_w /Biegespannung σ_{fc} bei vereinbarter Durchbiegung s_c (=1,5 h, entspricht $\epsilon_b=3,5\%$) bei 23 °C



Biegefestigkeit σ_{fc} /Biegespannung σ_{fc} bei vereinbarter Durchbiegung s_c ($=1,5$ h, entspricht $\epsilon_b=3,5$ %) bei 23 °C

28 Chemische Beständigkeit von Kunststoffen

Normen:

DIN EN ISO 175	Kunststoffe – Prüfverfahren zur Bestimmung des Verhaltens gegen flüssige Chemikalien
DIN EN ISO 4611	Kunststoffe – Bestimmung des Verhaltens bei Einwirkung von warmfeuchtem Klima, Sprühwasser und Salznebel
DIN EN ISO 11403	Kunststoffe – Ermittlung und Darstellung vergleichbarer Vielpunkt-Kennwerte T3: Umgebungseinflüsse auf Eigenschaften
DIN 53393	Verhalten von glasfaserverstärkten Kunststoffen bei Einwirkung von Chemikalien
DIN 53756	Prüfung von Kunststoff-Fertigteilen – Lagerungsversuch bei chemischer Beanspruchung

Siehe auch Normen über Spannungsrisssbildung (Kap. 31.2.2) und DIN EN ISO 22088:

Beständigkeitstabellen sind auch in CAMPUS 4.5 enthalten. Siehe auch Normen über Spannungsrisssbildung (Kap. 3.1.2.2).

Kunststoffe werden von vielen Medien angegriffen. Das Verhalten der Kunststoffteile ist dabei abhängig von ihrem chemischen Aufbau und von ihrer Struktur. So kann durch Erhöhen des kristallinen Anteils der Widerstand gegen Quellung in einem Medium verbessert werden, ebenso durch Erhöhung der molaren Masse (Molekulargewicht). Beimengungen im Kunststoff, wie Weichmacher, monomere Anteile und Füllstoffe begünstigen meist den Angriff von Chemikalien und Lösemitteln. Die Widerstandsfähigkeit von Kunststoffen gegenüber chemischen Medien kann vielfach nicht nur durch Angabe der *chemischen Beständigkeit*, des *Löse-* und *Quellverhaltens* gesehen werden. Es muss vielmehr auch die Möglichkeit einer Schädigung durch *Spannungsrisssbildung* (s. Kap. 31.2.2) berücksichtigt werden, die beim Vorhandensein von Chemikalien unter gleichzeitiger Wirkung von Eigen- und Betriebsspannungen im Formstoff ausgelöst werden kann. Durch Licht und erhöhte Temperatur, besonders in Gegenwart von Sauerstoff ändern sich im Laufe der Zeit viele Eigenschaften der Kunststoffe. So tritt oft nach Jahren eine *Versprödung* ein, wodurch Risse auftreten können. Diese „Alterung“ ist wesentlich vom chemischen Aufbau des Kunststoffs und den Umgebungsbedingungen abhängig (s. auch Kap. 31.6).

In Tabelle 28.2 ist das chemische Verhalten der im Teil II besprochenen Kunststoffe gegen ausgewählte Medien bei einer Temperatur von 23 °C zusammengestellt. In Tabelle 28.1 ist das Verhalten der Kunststoffe gegen weitere Lösemittel zu finden. In manchen Fällen bietet das Löseverhalten von Kunststoffen auch eine zusätzliche Möglichkeit zur Kunststoffidentifizierung (siehe Kap. 18).

Tabelle 28.1 Chemische Beständigkeit von Kunststoffen in verschiedenen Medien bei 23 °C

	PE	PP	PVC-U	PVC-P	PS	SB	SAN	ABS	ASA	CA/CAB/CP	PMMA	PA 6	PA 66	PA 11	PA 12	PA amorph	POM
Aceton	○	+	●	●	●	●	●	●	●	●	●	+	+	+	+	○	+
Alkohol (Ethylalkohol)	+	+	+	●	+	+	+	○	○	●	+	+	+	+	+	○	+
alkoholische Getränke	+	+	+	○ ³⁾	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+		+
Ammoniak wäbrig	+	+	+	+	+	+	+	+	+	●	+	+	+	+	+	○	+
Benzin	○ ²⁾	○	+	● ²⁾	●	●	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Benzol	○	○	●	● ²⁾	●	●	●	●	●	○ ²⁾	○	+	+	+	+	+	+
Dieselöl - Heizöl	+	+	+	○ ²⁾	○	○	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Dichlormethan	●	○	●	●	●	●	●	●	●	●	●	○	○	○	○	○	○
Essigsäure 10%	+	+	+	+	+	+	+	+	+	●	+	●	●	●	●	○	+
Ethylether	○	○	●	●	●	●	●	●	●	○ ²⁾	+	+	+	+	+	+	+
Fluorkohlenwasserstoffe	●	○	●	●	●	●	●	●	●	●	●	+	+	+	+	+	○
Fruchtsäfte	+	+	+	○ ³⁾	+	+	+	+	+	+ ³⁾	+	○	○	+	+	+	+
Geschirrspülmittel	+	+	+	○	+	+	+	+	+	○	+	○	○	○	○	+	+
Methanol	+	+	+	●	+	+	○	○	○	●	●	○	○	○	○	●	+
Milch	+	+	+	○ ³⁾	+	+	+	+	+	○ ³⁾	+	+	+	+	+	+	+
Mineralöle, -fette	+	+	+	○	○	○	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Ozon	○	○	○ ⁴⁾	○	+	○	+	+	+	+	+	●	●	●	●	●	●
Perchlorethylen	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	○	○	●	●	+	+
Salzsäure bis 35%	+	○	+	○	○	○	○	○	○	●	●	●	●	●	●	●	●
Schwefelsäure bis 40%	+	○	+	○	○	○	○	○	○	●	●	●	●	●	●	●	●
Seifenlösung wäbrig	+	+	+	+	+	+	+	+	+	●	+	+	+	+	+	+	+
Speiseöle, -fette	+	+	+	○ ³⁾	+	+	+	+	+	+ ³⁾	+	+	+	+	+	+	+
Toluol	○	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	+	+	+	+	+	+
Trichlorethylen	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	○	○	●	●	+	○
Waschmittellaugen	+	+	+	○	+	+	+	+	+	○	+	+	+	+	+	+	+
Wasser, Seewasser, kalt	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Wasser, heiß	+	+	○	○	+	+	+	+	+	○	+	○	○	○	○	●	+

+ beständig
 ○ bedingt beständig
 ● unbeständig

1) Verhalten bezieht sich auf PUR-Elastomere

2) Beständige Typen vorhanden

3) Nicht geeignet wegen Weichmacher

4) Abhängig von den Additiven der Öle/Fette

5) Nach Lebensmittelrecht nicht zugelassen

	PET	PBT	PC	PPE	PSU/PES	PPS	PI	PTFE	PF	MF	MP	UF	UP	EP	PUR ¹⁾	
	+	○	●	●	●	+	+	+	○	○	○	○	●	●	○	Aceton
	+	+	+	+	○ ²⁾	+	+	+	+	+	+	+	○	+	○	Alkohol (Ethylalkohol)
	+	+	+	+	+	+	+	+	○ ⁵⁾	+	○ ⁵⁾	alkoholische Getränke				
	+	+	●	+	+	+	●	+	○	+	+	+	○	+	○	Ammoniak wäßrig
	+	+	+	○	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	Benzin
	+	○ ²⁾	●	○	●	○	+	+	+	+	+	+	●	+	+	Benzol
	+	+	○	+ ⁴⁾	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	Diesöl – Heizöl
	●	●	●	●	●	+	+	+	+	+	+	+	○	○	○	Dichlormethan
	+	○ ²⁾	+	+	+	+	+	+	○	○	○	○	+	●	○	Essigsäure 10%
	+	+	●	●	+	+	+	+	+	+	+	+	○	+	+	Ethylether
	+	+	●	●	●	+	+	+	○	○	○	○	○	○	●	Fluorkohlenwasserstoff
	+	+	+	+	+	+	+	+	+ ⁵⁾	+	+ ⁵⁾	+ ⁵⁾	+ ⁵⁾	○ ⁵⁾	+ ⁵⁾	Fruchtsäfte
	+	+	○ ²⁾	+	+	+	○	+	○	+	○	○	○	+	+	Geschirrspülmittel
	+	+	●	+	○ ²⁾	+	+	+	+	+	+	+	○	+	○	Methanol
	+	+	+	+	+	+	+	+	+ ⁵⁾	+	+ ⁵⁾	Milch				
	+	+	+	○ ⁴⁾	+ ⁴⁾	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	Mineralöle, -fette
			+	+	+	+	○	+	+	+	+	+	○	+	○	Ozon
	+	+	●	●	●	○	+	+	○	+	+	+	○	○	○	Perchloroethylen
	○	●	○	+	+	+	○	+	●	●	●	●	●	+	●	Salzsäure bis 35%
	●	●	+	+	+	+	○	+	●	●	●	●	●	+	●	Schwefelsäure bis 40%
	+	+	+	+	+	+	○	+	○	+	+	+	+	+	+	Seifenlösung wäßrig
	+	+	+	+	+	+	+	+	+ ⁵⁾	+	+ ⁵⁾	+ ⁵⁾	+ ⁵⁾	+ ⁵⁾	+	Speiseöle, -fette
	+	○	●	●	●	○	+	+	+	+	+	+	○	+	○	Toluol
		●	●	●	●	○	+	+	○	+	+	+	○	●	○	Trichlorethylen
	+	+	○ ²⁾	+	+	+	○	+	○	+	+	+	+	+	○	Waschmittellaugen
	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	Wasser, Seewasser, kalt
	○	○	○	+	○ ²⁾	+	○	+	○ ²⁾	+	+	○	●	○	●	Wasser, heiß

PET PBT PC PPE PSU/PES PPS PI PTFE PF MF MP UF UP EP PUR¹⁾

Tabelle 28.2 Lösungsverhalten von Kunststoffen (Beispiele)

Kunststoff	Kunststoffgruppe	Lösungsverhalten in kaltem Lösemittel							
		Benzin	Benzol	Dichlor- methan	Ethylether	Aceton	Ethylacetat	Ethylalkohol	Wasser
1)	2)								
PE	T	u/q	u/q	u	u/q	u/q	u/q	u	u
PP	T	u/q	u/q	u/q	u/q	u	u/q	u	u
PB	T	q	u/q	q	u/q	u	u/q	u	u
PVC-U	T	u	u/q	q/l	u/q	q/l	u/q	u	u
PVC-P	T	u/q	q	q	q	q	q	q	u
PS	T	q/l	l	l	l	l	l	u	u
SB	T	l	l	l	l	l	l	u	u
SAN	T	u	q	q	q	l	l	u	u
ABS	T	u/q	q	q	l	l	l	q	u
ASA	T	q	q	q	l	l	l	q	u
CA/CP/CA	T	u	u/q	q/l	u/q	l	u/l	q/l	u
PMMA	T	u	l	l	u	l	l	u	u
PA 6	T	u	u	u	u	u	u	u	u
PA 66	T	u	u	u	u	u	u	u	u
PA 11	T	u	u	u	u	u	u	u	u
PA 12	T	u	u	u	u	u	u	u	u
PA amorph	T	u	u	q/l	u	q/l	u	l	u
POM	T	u	u	q/l	u	u	u	u	u
PET	T	u	u	q	u	u	q	u	u
PBT	T	u	u/q	q	u	u/q	q	u	u
PC	T	u	q	l	q	q/l	q	u	u
PPE mod.	T	q	q	l	q/l	u/q	q	u	u
PSU/PES	T	u	l	l	u	q	u/q	u	u
PPS	T	u	u	u	u	u	u	u	u
PI	T, D	u	u	u	u	u	u	u	u
PTFE	TE	u	u	u	u	u	u	u	u
PVDF	T	u	u	u	u	u	u	u	u
PF 3)	D	u	u	u	u	u	u	u	u
MF 3)	D	u	u	u	u	u	u	u	u
MP 3)	D	u	u	u	u	u	u	u	u
UF 3)	D	u	u	u	u	u	u	u	u
UP	D	u	q	q	q	q	q	q	u
EP	D	u	u	q	u	q	q	u	u
PUR	T, D, E	u	u	q	u	q	q	q	u
Aramid	D	u	u	u	u	u	u	u	u

¹⁾ Angaben beziehen sich auf den Kunststoff ohne Zusatz

²⁾ l: löslich
q: quellbar
u: unlöslich

³⁾ Angaben beziehen sich auf Formstoffe mit Füllstoffen

29 Viskositätsmessungen

29.1 Viskositätsmessungen an Thermoplasten

Die Viskosität (Fließfähigkeit) ist in erster Linie ein Maß für die *mittlere molare Masse* (Molekulargewichtsverteilung). Die Viskositätsprüfungen dienen zur *Wareneingangsprüfung* von thermoplastischen Formmassen, zur *Überwachung der Gleichmäßigkeit der Chargen* und zur *Beurteilung der Verarbeitungsmöglichkeit* z. B. durch Spritzgießen und Extrudieren. Bei den verschiedenen Verarbeitungsprozessen von thermoplastischen Formmassen treten Veränderungen im Aufbau auf, z. B. Kettenabbau, thermische Schädigungen usw., die sich als Änderung der Viskosität im Formstoff äußern. Die Viskositätsmessungen können daher auch als *Qualitätsprüfung* nach der Verarbeitung im Vergleich zum Ausgangszustand der Formmasse herangezogen werden.

Füll- und Verstärkungsstoffe z. B. Glasfasern beeinflussen die Viskosität und wirken sich unterschiedlich bei den einzelnen Prüfmethoden aus. Bei der Ermittlung des *Schmelze-Massefließrate* bzw. *Schmelze-Volumenfließrate* (siehe Kap. 29.1.1) wird die Formmasse mit Füllstoff geprüft, bei *Lösungsviskositätsmessungen* (siehe Kap. 29.1.4) kann nur der thermoplastische Grundstoff geprüft werden, weil aus versuchstechnischen Gründen (enge Kapillare) der Füllstoff entfernt werden muss. Die Bestimmung der *Fließfähigkeit* und des *Erstarrens* von glasmattenverstärkten Thermoplasten (GMT) erfolgt nach DIN EN 14447.

Zur Kennzeichnung von thermoplastischen Formmassen nach DIN EN ISO werden je nach Kunststoff u. a. *Schmelze-Massefließrate* MFR, *Schmelze-Volumenfließrate* MVR, *Viskositätszahl J* (VZ, VN) und K-Wert herangezogen.

Zwischen Schmelze-Massefließrate MFR und Viskositätszahl J besteht ein direkter Zusammenhang; die Bestimmung des Schmelze-Massefließrate und vor allem der Schmelze-Volumenfließrate ist meist wesentlich einfacher.

29.1.1 Bestimmung von Schmelze-Massefließrate und Schmelze-Volumenfließrate

(früher Schmelzindex und Volumen-Fließindex)

Norm:

DIN EN ISO 1133 Kunststoffe – Bestimmung der Schmelze-Volumenfließrate (MVR) und Schmelze-Massefließrate (MFR) von Thermoplasten
T1: Allgemeines Prüfverfahren
T2: Verfahren für Materialien, die empfindlich gegen eine zeit- bzw. temperaturabhängige Vorgeschichte und/oder Feuchte sind