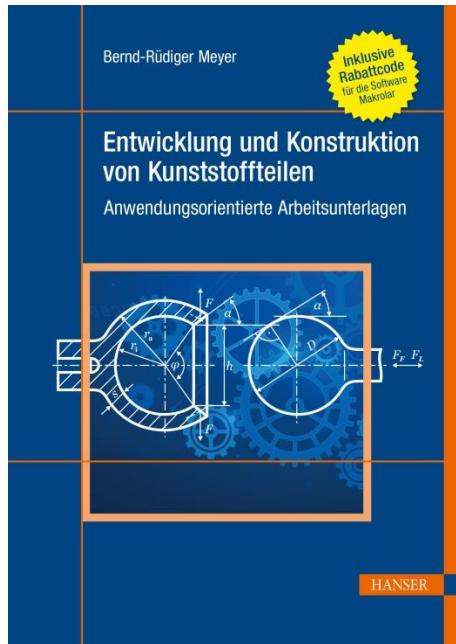


# HANSER



## Leseprobe

zu

# Entwicklung und Konstruktion von Kunststoffteilen

von Bernd-Rüdiger Meyer

Print-ISBN: 978-3-446-46292-2

E-Book-ISBN: 978-3-446-46841-2

Weitere Informationen und Bestellungen unter

<https://www.hanser-kundencenter.de/fachbuch/artikel/9783446462922>

sowie im Buchhandel

© Carl Hanser Verlag, München

# Inhalt

<b>Vorwort .....</b>	<b>XXI</b>
<b>Der Autor .....</b>	<b>XXIII</b>
<b>1 Struktur – Eigenschaftsbeziehungen der Polymere .....</b>	<b>1</b>
1.1 Übersichten .....	1
1.2 Konstitution und Konfiguration der Makromoleküle .....	4
1.2.1 Zusammensetzung, Größe und Gestalt der Makromoleküle .....	4
1.2.2 Zwischenmolekulare Kräfte (ZMK) .....	9
1.2.3 Chemische Struktur thermoplastischer Polymere .....	11
1.2.4 Nomenklatur und Kurzzeichen spezieller Polymergruppen .....	18
1.3 Konformation und Aggregation der Makromoleküle .....	19
1.3.1 Einführung .....	19
1.3.2 Molekulare und morphologische Ordnungsstrukturen ..	21
1.3.3 Thermische Zustandsänderungen der Polymere .....	24
1.3.4 Vernetzungsstrukturen der Polymere .....	26
1.3.5 Abmessungsbereiche molekularer und morphologischer Strukturelemente .....	29
1.3.6 Löslichkeit und Quellbarkeit der Polymere .....	30
1.4 Dilatometrisches und mechanisches Eigenschaftsbild der Kunststoffe .....	31
1.4.1 Thermische Zustände und Übergangsbereiche von Polymeren (außer LCP) .....	31
1.4.2 p-v-T-Verhalten von Thermoplasten .....	32
1.4.3 Bereiche mechanischer und dilatometrischer Eigenschaften der Polymere (außer LCP) .....	33

1.4.4	Orientierung molekularer und morphologischer Strukturen durch Reck- und Fließprozesse .....	34
1.4.5	Zeitabhängiges Deformationsverhalten der Polymere ...	35
1.5	Stoffliche Modifizierung der Polymere .....	36
1.5.1	Funktionsadditive und chemische Modifizierung .....	36
1.5.2	Füll- und Verstärkungsstoffe .....	38
1.5.3	Schaumstoffe .....	41
1.5.4	Äußere Weichmachung und Brennbarkeitsminderung ..	43
1.5.5	Polymermischungen und Werkstoffkombinationen ....	44
<b>2</b>	<b>Systematische Kunststoffauswahl für Formstoffe .....</b>	<b>49</b>
2.1	Übersicht .....	49
2.1.1	Gliederung der Anforderungen .....	50
2.1.2	Werkstoffentscheidung .....	50
2.1.3	Software zur Kunststoffvorauswahl .....	52
2.2	Einführung zur Kunststoffauswahl .....	52
2.2.1	Richtlinien für die Kunststoffvorauswahl .....	52
2.2.2	Übergeordnete Polymerstrukturmatrix und Beständigkeitskriterien der Kunststoffe .....	53
2.3	Medienbeständigkeit und Wasseraufnahme .....	57
2.3.1	Medienbeständigkeit (ohne Spannungsrissbildung) ....	57
2.3.2	Bewertung der Medienbeständigkeit (ohne Spannungsrissbildung) .....	60
2.3.3	Wasseraufnahme .....	62
2.4	Wärmealterungsbeständigkeit und hydrothermische Beständigkeit .....	64
2.4.1	Wärmealterungsbeständigkeit .....	64
2.4.2	Hydrothermische Beständigkeit .....	68
2.5	Strahlenbeständigkeit und Witterungsbeständigkeit .....	68
2.5.1	Strahlenbeständigkeit .....	68
2.5.2	Witterungsbeständigkeit .....	70
2.6	Werkstoffdichte und Kohäsionsenergiedichte .....	72
2.6.1	Werkstoffdichte .....	72
2.6.2	Kohäsionsenergiedichte .....	72
2.7	Steifigkeit/Härte und Wärmedehnung .....	73
2.7.1	Steifigkeit/Härte .....	73
2.7.2	Wärmedehnung .....	77

2.8	Wärmeformbeständigkeit, Kriechneigung und mechanische Dämpfung .....	78
2.8.1	Wärmeformbeständigkeit .....	78
2.8.2	Kriechneigung der Kunststoffe .....	83
2.8.3	Mechanische Dämpfung .....	83
2.9	Umgebungsbedingte Spannungsrißbildung (ESC) .....	84
2.9.1	Spannungsrißbildung (ESC) im Zusammenhang mit der Kunststoffvorauswahl .....	84
2.9.2	Phänomen .....	85
2.9.3	Rissbildungsarten .....	86
2.9.4	Umgebungsbedingungen .....	87
2.9.5	Medienaktivität bei Thermoplasten .....	88
2.9.6	Richtwertbereiche kritischer Dehnungen aus Prüfungen in Luftumgebung .....	90
2.10	Dehnbarkeit und Schlagzähigkeit .....	91
2.10.1	Einleitung .....	91
2.10.2	Dehnbarkeit .....	92
2.10.3	Schlagzähigkeit .....	93
2.11	Reibung und Verschleiß .....	94
2.11.1	Einleitung .....	94
2.11.2	Gleitreibungskoeffizient ( $\mu$ ) .....	95
2.11.3	Verschleiß .....	96
2.12	Lichtdurchlässigkeit (Transparenz) .....	98
2.13	Brennbarkeit und Verbrennungsenthalpie .....	99
2.13.1	Einleitung .....	99
2.13.2	Brennbarkeit .....	99
2.13.3	Verbrennungsenthalpie (unterer Heizwert) .....	101
2.14	Elektrisches Isoliervermögen und elektrostatische Aufladbarkeit .....	104
2.15	Dielektrische Verluste und Kriechstromfestigkeit .....	105
2.15.1	Dielektrische Verluste .....	105
2.15.2	Kriechstromfestigkeit .....	107
2.16	Wärmeleitung .....	109
2.16.1	Einleitung .....	109
2.16.2	Bereiche und Vergleichswerte von Wärmeleitzahlkennwerten bei 23 °C .....	110
2.16.3	Auswahlaspekte .....	110
2.16.4	Berechnung der Wärmeleitkennzahlen von Kunststoffen mit festen Zusatzstoffen .....	111
2.16.5	Wärmeübertragung bei Kontakt von Feststoffschichten .....	112

2.17	Maßhaltigkeit von Kunststoff-Formteilen .....	113
2.17.1	Einleitung .....	113
2.17.2	Verarbeitungsschwindung (VS) von Kunststoff-Formmassen .....	114
2.17.3	Toleranzgruppen (TG) als Bewertungsmaßstab der Fertigungsgenauigkeit nach DIN 16742 und DIN ISO 20457 .....	116
2.17.4	Anwendungsbedingte Maßänderungen .....	118
2.18	Klimadaten für technische Anwendungen .....	123
2.18.1	Einleitung .....	123
2.18.2	Klimabegriffe und Klimagrößen .....	123
2.18.3	Klimadaten für Freiluftklimamodelle .....	125
2.18.4	Klimadaten für Raumklimamodelle .....	126
2.18.5	Kennzeichnung der Freiluftklimagebiete der Erde .....	126
2.18.6	Bestimmung der klimaabhängigen Wassersättigungskonzentration für Kunststoffe und andere Werkstoffe .....	129
2.19	Demonstrationsbeispiel zur Kunststoffvorauswahl .....	129
<b>3</b>	<b>Überschlägige Bestimmung deformationsmechanischer Kennwerte von Kunststoffen .....</b>	<b>131</b>
3.1	Einführung .....	131
3.2	Abschätzmethoden .....	136
3.2.1	Basisdaten aus Normprüfung kohärenter Kompaktstoffe .....	136
3.2.2	Zeitverlaufsarten (ZVA) .....	137
3.2.3	Reduktionsfaktoren (F) .....	138
3.2.4	Linearitätsfaktoren, Deformationskennwerte, zulässige Spannungen .....	140
3.2.5	Gewaltbruchsicherheit .....	141
3.3	Ausgewählte Stützkernstoffe für Verbundkonstruktionen .....	142
3.3.1	Einleitung .....	142
3.3.2	Homogene Polyurethanhartschaumstoffe (PUR-HS) .....	142
3.3.3	Papierwabenstoffe .....	143
3.4	Strukturschaumstoffe (Integralschaumstoffe) .....	144
3.4.1	Einleitung .....	144
3.4.2	Bestimmung des Ersatzursprungsmodul $E_{R0}$ für flächige Strukturschaumstoffbauteile .....	145
3.5	Bestimmung des wirtschaftlichen Fasergehalts mechanisch beanspruchter Verbundkunststoffe (Composite) .....	147

<b>4 Nachweis der Knick-, Kipp- und Beulstabilität für Leichtbaukonstruktionen . . . . .</b>	<b>151</b>
4.1 Berechnungsgrundlagen . . . . .	151
4.1.1 Einleitung . . . . .	151
4.1.2 Basisgleichungen für die Stabilitätsnachweise . . . . .	152
4.2 Biegedrillknicken von geraden Stäben und Trägern . . . . .	154
4.2.1 Einleitung . . . . .	154
4.2.2 Einspannfälle und Einspannwerte für das Biegeknicken . . . . .	155
4.2.3 Querschnittskennwerte . . . . .	156
4.2.4 Stabknicken durch mittige und richtungstreue Axialdruckkräfte . . . . .	157
4.2.5 Kippen biegebeanspruchter Träger . . . . .	158
4.2.6 Berechnungsparameter für Kippbeanspruchung . . . . .	159
4.2.7 Scheitelknicken biegebeanspruchter Träger mit Hohlzylinderquerschnitt . . . . .	162
4.2.8 Örtliches Beulen von Stäben (Profilen) mit Querschnitten aus dünnwandigen Scheiben bei Axialdruckbelastung . .	162
4.2.9 Berechnungsbeispiel zum örtlichen Scheibenbeulen . .	167
4.3 Beulen von Platten und Plattenstreifen . . . . .	169
4.3.1 Einleitung . . . . .	169
4.3.2 Beulen von Rechteckplatten durch einachsige Druckbeanspruchung . . . . .	169
4.3.3 Beulen isotroper Platten durch konstante Randdruckspannungen . . . . .	171
4.3.4 Beulen von Rechteckplatten durch konstante Randschubspannungen . . . . .	172
4.4 Beulen oder Knicken dünnwandiger Schalen . . . . .	173
4.4.1 Einleitung . . . . .	173
4.4.2 Beulen oder Drillknicken dünnwandiger Hohlzylinder durch Torsionsbeanspruchung . . . . .	174
4.4.3 Beulen oder Knicken dünnwandiger Hohlzylinder durch Axialdruckbeanspruchung und/oder Biegebeanspruchung . . . . .	176
4.4.4 Beulen dünnwandiger Hohlzylinder durch Radialdruckbeanspruchung (Manteldruck) . . . . .	178
4.4.5 Beulen oder Knicken dünnwandiger Hohlzylinder durch kombinierte Beanspruchung . . . . .	179
4.4.6 Beulen und Knicken von Kegelschalen . . . . .	180
4.4.7 Beulen offener Zylinderschalen durch Axialdruckbeanspruchung . . . . .	181

4.4.8	Beulen dünnwandiger Hohlzylinder durch Radialdruckbeanspruchung bei elastischer Außenbettung .....	182
4.4.9	Beulen ringversteifter Hohlzylinder durch Radialdruckbeanspruchung (Manteldruck) .....	183
4.4.10	Beulen von Hohlzylindern mit profilierten und/oder mehrschichtigen Wänden durch Radialdruckbeanspruchung (Manteldruck) bei bekannter Ringsteifigkeit .....	186
4.4.11	Beulen dünnwandiger und isotroper Kugelschalen durch radiale Druckbeanspruchung .....	187
4.5	Stabilitätsnachweise für Stützkernverbundbauteile (Sandwichkonstruktionen) .....	188
4.5.1	Einleitung und Voraussetzungen .....	188
4.5.2	Örtliches Beulen bei Stützkernverbundbauteilen .....	189
4.6	Berechnungsbeispiele .....	190
<b>5</b>	<b>Bestimmung von Wärmeübergangszahlen für Wärmeübertragungsvorgänge der Polymerverarbeitung und -anwendung .....</b>	<b>193</b>
5.1	Problemabgrenzung und Zielbestimmung .....	193
5.2	Stoffkennwerte für die Wärmeübergangsrechnung .....	195
5.2.1	Stoffdaten für Wärmeträgermedien .....	195
5.2.2	Emissionsgrade wärmeabstrahlender Körperoberflächen (Graustrahler) .....	198
5.3	Thermische und rheologische Randbedingungen der Wärmeübergangsrechnung .....	200
5.4	Ähnlichkeitskennzahlen des konvektiven Wärmeübergangs ...	203
5.5	Wärmeübergangszahlen für durchströmte Kanäle .....	205
5.5.1	Kanalgrundformen .....	205
5.5.2	Bestimmungsgrößen der Kanäle .....	207
5.5.3	Nußeltgleichungen .....	208
5.5.4	Querschnittsabhängige Kennwerte und Thermikfaktoren .....	210
5.5.5	Oberflächenzustand und Sandraigkeitskennwerte der Kanäle .....	212
5.6	Wärmeübergangszahlen für Einzelkörper in isothermer Umgebung .....	214
5.6.1	Umgebungsmodell und Berechnungskonzept .....	214
5.6.2	Wärmeübergangszahlen durch freie und erzwungene Konvektion .....	216

5.6.3	Wärmeübergangszahlen durch Wärmeleitung in das Konvektionsmedium .....	218
5.6.4	Äquivalente Wärmeübergangszahlen durch Wärmestrahlung .....	219
5.7	Wärmeübergangszahlen für Filmkondensation von Wasserdampf .....	220
5.8	Wärmeübergangszahlen für geschlossene Spaltquerschnitte mit Fluidfüllung .....	221
5.9	Äquivalente Wärmeübergangszahlen durch Rippenwirkung von Aufspannplatten .....	223
5.10	Anwendungsbeispiele .....	225
<b>6</b>	<b>Ausgewählte rheologische Grundlagen für Thermoplastschmelzen .....</b>	<b>227</b>
6.1	Scherströmung und Stoffansätze .....	227
6.1.1	Einleitung .....	227
6.1.2	Rheologische Stoffansätze für stationäres Scherfließen strukturviskoser Fluide ohne Fließgrenze .....	229
6.1.3	Abnahme der Viskosität und Vergrößerung der entropieelastischen Rückverformungskräfte durch strömungsbedingte Molekülorientierung .....	232
6.2	Rheologische Bestimmungsgrößen und Strömungsverlaufsformen .....	233
6.2.1	Druckströmung in beheizten Kanälen (z.B. Extrusion) .....	233
6.2.2	Scherströmung mit Randschichterstarrung (z.B. Spritzgießen) .....	234
6.2.3	„Strömungslegenden“ bei volumetrischer Werkzeugfüllung durch Quellströmung .....	235
6.2.4	Überlagerung von Scher- und Dehnströmungen beim Spritzgießen .....	236
6.3	Bestimmung der rheologisch repräsentativen Fluidtemperatur bei Druckströmungen .....	237
6.3.1	Aufgabenstellung und Berechnungsmodell .....	237
6.3.2	Strömungstemperaturfeld ohne Randschichterstarrung .....	237
<b>7</b>	<b>Grundlagen des werkstofflichen Recycling von Kunststoffen</b>	<b>239</b>
7.1	Entsorgungsmethoden und Stoffkreisläufe .....	239
7.1.1	Entsorgungsmethoden .....	239

7.1.2	Stoffkreisläufe der Kunststoffverarbeitung und -anwendung .....	241
7.1.3	Verarbeitungskreislaufmodell für die Ermittlung zulässiger Rezyclatanteile .....	241
7.1.4	Ausgewählte Veröffentlichungen zum Thema .....	242
7.2	Werkstoffliche Voraussetzungen für Kunststoffrecycling und Regeln für das recyclingorientierte Entwickeln von Kunststoffteilen .....	243
7.2.1	Eigenschaftsänderung der Kunststoffe bei Verarbeitung und Anwendung .....	243
7.2.2	Regeln und Richtlinien für das recyclingorientierte Entwickeln von Kunststoffteilen .....	244
7.3	Wiederverarbeitungsstrategien für Thermoplastrezyclat in geschlossenen Verarbeitungskreisläufen .....	246
7.3.1	Minimalstrategie: Kein Rezyclatzusatz bzw. nur geringe Rezyclatanteile zum Originalmaterial .....	246
7.3.2	Blendstrategie: Eigenschaftsoptimierte Mischung aus Rezyclat und Originalmaterial .....	246
7.3.3	Maximalstrategie: Kein Originalmaterialzusatz zum Rezyclat .....	247
7.4	Mathematische Modellierung der Verarbeitungskreisläufe .....	248
7.4.1	Materialzusammensetzung der Fertigteile in Verarbeitungskreisläufen (Beispiel) .....	248
7.4.2	Eigenschaftsaddition .....	249
7.5	Demonstrationsbeispiele .....	251
<b>8</b>	<b>Orientierende Wirtschaftlichkeitsvergleiche für Fertigungsvarianten zur Herstellung von Spritzgieß- und Pressteilen</b> .....	255
8.1	Einführung .....	255
8.1.1	Zielstellung .....	255
8.1.2	Voraussetzungen und Handhabung .....	255
8.2	Bestimmung von Basisdaten für Fertigungsvarianten .....	257
8.2.1	Verfahrenszuordnung und Fertigungsstückzahlen .....	257
8.2.2	Verfügbare Maschinenlaufzeit und Ausschussabschätzung .....	258
8.2.3	Arbeitsplatzstruktur, Maschinenbelegung und Maschinenbedienung .....	258
8.3	Abschätzung der Verschleißstandzahl für Spritzgieß- und Presswerkzeuge .....	260
8.3.1	Einleitung .....	260

8.3.2	Abschätzkonzept für die Verschleißstandzahl .....	260
8.3.3	Kompliziertheit des Werkzeugaufbaus ( $a_1$ ) .....	261
8.3.4	Mechanische Werkzeugbeanspruchung ( $a_2$ ) .....	262
8.3.5	Verschleißwiderstand der Werkzeugkonturteile ( $a_3$ ) .....	262
8.3.6	Konturoberflächenbeschaffenheit ( $a_4$ ) .....	263
8.3.7	Fertigungstoleranzforderungen ( $a_5$ ) .....	263
8.3.8	Abrasionsverschleiß durch Polymerschmelzen ( $a_6$ ) .....	264
8.4	Überschlägige Berechnung von Maschinenstundensätzen für Spritzgießmaschinen und Pressen .....	265
8.4.1	Einleitung .....	265
8.4.2	Maschinenteilkostensatz .....	265
8.4.3	Raumnutzungsteilkostensatz .....	266
8.4.4	Energieteilkostensatz .....	267
8.5	Kalkulation der Vergleichsstückkosten .....	268
8.5.1	Berechnungskonzept .....	268
8.5.2	Materialkosten ( $K'_M$ ) .....	269
8.5.3	Fertigungskosten ( $K'_F$ ) .....	270
8.5.4	Werkzeugkosten ( $K'_W$ ) .....	270
8.5.5	Ausschuss- und Qualitätssicherungskosten .....	271
8.6	Bestimmung optimaler Werkzeugfachzahlen, des Werkzeugbedarfs und der Maschinenbelegungszeit .....	271
8.6.1	Einleitung .....	271
8.6.2	Berechnung der optimalen Fachzahl .....	272
8.6.3	Werkzeugbedarf und Maschinenbelegungszeit .....	273
8.7	Bestimmung gewinnoptimaler Losgrößen .....	274
8.8	Strukturierung zeitlicher Fertigungsabläufe in der kunststoffverarbeitenden Industrie (kvI) .....	275
8.9	Demonstrationsbeispiel .....	277
<b>9</b>	<b>Bestimmung der Zykluszeit für das Thermoplastspritzgießen</b>	
	.....	281
9.1	Einführung .....	281
9.2	Polymer- und Zusatzstoffdatei .....	283
9.3	Stoffdaten der Formmassen und Werkzeugkonturwerkstoffe ...	292
9.4	Spritzlinggeometrie .....	294
9.5	Auswahl der Verarbeitungsparameter nach Qualitätsanforderungen und rheologischen Bedingungen .....	308
9.5.1	Werkzeugtemperierung .....	308
9.5.2	Massetemperatur ( $\vartheta_M$ ) und Einspritzdruck ( $p_S$ ) .....	310

9.5.3	Entformungstemperatur . . . . .	310
9.5.4	Festlegung der Werkzeugkonturtemperatur bei Einspritzbeginn ( $\vartheta_W$ ) . . . . .	313
9.5.5	Mehrkomponentenspritzgießen . . . . .	313
9.6	Kühlzeitberechnungsgleichungen . . . . .	314
9.7	Zykluszeitberechnung . . . . .	315
9.8	Berechnungsbeispiele . . . . .	316
<b>10</b>	<b>Berechnung von Kunststoffstirnradgetrieben . . . . .</b>	<b>319</b>
10.1	Berechnungsgegenstand . . . . .	319
10.2	Werkstoffdaten . . . . .	322
10.2.1	Basisdaten für Kunststoffe und Metalle . . . . .	322
10.2.2	Maximal zulässige Zahnflankentemperatur ( $\vartheta_{F\max}$ ) . . . . .	324
10.2.3	Bestimmung des Reibungskoeffizienten ( $\mu$ ) . . . . .	324
10.2.4	Steifigkeits- und Festigkeitsdaten für Kunststoffe ( $E_K$ , $v_K$ , $\sigma_{FP}$ , $\sigma_{HP}$ ) . . . . .	325
10.3	Zahnradberechnung . . . . .	326
10.3.1	Geometrie- und Betriebsdaten . . . . .	327
10.3.2	Zahnradspannungen und -verformungen sowie thermische Funktionsparameter einschließlich Sicherheitsnachweise . . . . .	329
10.4	Berechnungsbeispiele . . . . .	333
<b>11</b>	<b>Berechnung und Gestaltung von Schnappverbindungen . . . . .</b>	<b>339</b>
11.1	Verbindungsprinzip und Verbindungsarten . . . . .	339
11.2	Konstruktionshinweise . . . . .	341
11.3	Rastelemente und Werkstoffdaten . . . . .	342
11.3.1	Geometrie und Reibkraftübersetzung von Rastelementen . . . . .	342
11.3.2	Reibungskoeffizient, Deformationsmechanik, Festigkeitsnachweis . . . . .	344
11.4	Funktionsnachweis für Torsionsschnappverbindungen . . . . .	344
11.4.1	Berechnungskonzept . . . . .	344
11.4.2	Torsionsfederquerschnittskennwerte . . . . .	345
11.4.3	Geometrisches Modell und Belastungsschema . . . . .	346
11.4.4	Festigkeitsnachweis und Betriebskraftberechnung . . . . .	346
11.5	Funktionsnachweise für Biegeschnappverbindungen einschließlich segmentierter Zylinderschnappverbindungen . . . . .	347

11.5.1	Berechnungskonzept .....	347
11.5.2	Flächenträgheitsmomente, Querschnittsflächen und Randfaserabstände typischer Biegefederquerschnitte ..	348
11.5.3	Funktionsnachweis für gerade Biegefedern (Kragträger) .....	349
11.5.4	Funktionsnachweis für gekrümmte Biegefedern (Bogenträger) .....	351
11.6	Funktionsnachweise für geschlitzte Zylinderschnappverbindungen .....	352
11.6.1	Berechnungskonzept .....	352
11.6.2	Geometrisches Modell und Belastungsschema .....	352
11.6.3	Festigkeitskontrolle am Innenrand (Einspannstelle in Abbildung: - - -) .....	353
11.6.4	Füge- und Lösekraft .....	353
11.7	Funktionsnachweise für geschlossene Zylinderschnappverbindungen .....	353
11.7.1	Berechnungskonzept .....	353
11.7.2	Geometrisches Modell und Belastungsschema .....	354
11.7.3	Deformationsmechanische Werkstoffkennwerte .....	355
11.7.4	Festigkeitsnachweise .....	356
11.7.5	Füge- und Lösekraftberechnung .....	357
11.7.6	Stabilitätsnachweis für den Fügevorgang geschlossener Zylinderschnappverbindungen .....	357
11.8	Funktionsnachweise für geschlossene Kugelschnappverbindungen .....	357
11.8.1	Berechnungskonzept .....	357
11.8.2	Geometrisches Modell und Belastungsschema .....	358
11.8.3	Festigkeitskontrolle für Einführungszone sowie Füge- und Lösekraftberechnung .....	358
11.9	Gestaltungsbeispiele .....	359
11.9.1	Entformung von funktionsbedingten Hinterschneidungen .....	359
11.9.2	Verringerung der Hakenbeanspruchung und vereinfachte Montagemöglichkeiten durch Mehrfachhaken .....	360
11.9.3	Schnapphakengestaltung zur Reduzierung von Füge- und Lösekräften und zur Vermeidung unzulässiger Scherdeformationen .....	362
11.9.4	Werkzeugtechnisch günstige Gestaltung von Schnappverbindungen .....	364
11.9.5	Clip-Variationen .....	365

11.9.6	Geschlossene Zylinderschnappverbindungen (Ringschnappverbindungen) für große Lösekräfte .....	365
11.9.7	Verformungsbegrenzung und Sicherung von Schnappverbindungen .....	366
11.9.8	Schnappverbindungen als Verschlusselemente .....	368
11.9.9	Gestaltung von Kugelschnappverbindungen .....	369
11.9.10	Funktionskombinationen für Schnappverbindungen ...	370
11.9.11	Bildquellen .....	371
11.10	Berechnungsbeispiele .....	371
<b>12</b>	<b>Berechnung von biegebeanspruchten Platten und Plattenstreifen</b> .....	<b>379</b>
12.1	Einführung .....	379
12.1.1	Aufgabenstellung .....	379
12.1.2	Werkstoffdaten .....	380
12.2	Membranplattenberechnung .....	380
12.2.1	Kreismembranplatten mit gleichverteilter Druckbeanspruchung .....	380
12.2.2	Rechteckmembranplatten mit gleichverteilter Druckbeanspruchung und gleicher Randeinspannung am Umfang .....	382
12.3	Gestaltung und Berechnung versteifter Plattenstreifen und gerader Träger .....	385
12.3.1	Rippengestaltung und Bemessungsrichtwerte für Formteile .....	385
12.3.2	Zielstellung und Anwendungsbereiche für Plattenstreifen .....	386
12.4	Berechnung von biegesteifen Verbundplattenstreifen .....	388
12.4.1	Einleitung und Voraussetzungen .....	388
12.4.2	Berechnungsgleichungen für biegebeanspruchte Verbundplattenstreifen .....	389
12.5	Berechnungsdaten für ausgewählte Biegelastfälle .....	391
12.5.1	Maximales Biegemoment ( $M_{b\max}$ ) und maximale Querkraft ( $Q_{\max}$ ) sowie Konstanten g und z für ausgewählte Biegelastfälle gerader Träger und Plattenstreifen .....	391

12.5.2 Gleichförmig gekrümmter Haken mit Kreisquerschnitt unter Zugbelastung .....	392
12.6 Berechnungsbeispiele .....	392
<b>13 Berechnung und Gestaltung zylindrischer Pressverbindungen .....</b>	<b>397</b>
13.1 Einführung .....	397
13.1.1 Verbindungsprinzip und Fügebedingungen .....	397
13.1.2 Haftreibungskoeffizient und Werkstoffdaten .....	399
13.1.3 Toleranzdaten und Belastungsgrößen .....	400
13.2 Bestimmung von Fugenpressung und Übermaß .....	402
13.2.1 Passungssysteme nach DIN EN ISO 286 und Näherungswerte für Pressfugendurchmesser .....	402
13.2.2 Bestimmung der Fugenpressung .....	403
13.2.3 Anwendungsbedingte Maßverschiebungen und Maßstreuungen der Passteile .....	405
13.2.4 Bestimmung und Tolerierung der Fügedurchmesser durch Passungsberechnung nach DIN EN ISO 286 (2010) .....	406
13.3 Einpresskräfte und Stabilitätsnachweise .....	408
13.3.1 Einpresskräfte ( $F_E$ ) .....	408
13.3.2 Beulstabilitätsnachweise .....	409
13.4 Berechnungsbeispiel .....	410
<b>Index .....</b>	<b>413</b>



# Vorwort

Diese ausgewählten Arbeitsunterlagen zur Entwicklung und Konstruktion von Kunststoffteilen entstanden aus einer Studien- und Arbeitsblattsammlung für die Ausbildung von Kunststoffingenieuren und für die Weiterbildung von Technikern und Ingenieuren, die mit der Entwicklung, Herstellung und Anwendung von Kunststoffteilen befasst waren und sind.

Die inhaltliche Darstellung der Themen und deren Weiterentwicklung beziehen sich auf einen Zeitraum und Erfahrungen von ca. 55 Jahren.

Bei der Auswahl der Themen wurde vom Autor angestrebt, dass diese dem Leser aktuelle und möglichst originelle Anregungen und praktische Nutzungsmöglichkeiten bieten können. Es handelt sich um eine analoge Basis speziellen Fachwissens, die durch entsprechende Software für praktische Anwendungen digital aufbereitet werden kann.

Die Literaturangaben beziehen sich in erster Linie auf die Ursprungs- und Einstiegsliteratur des Autors für die Zielstellungen der jeweiligen Themen. Damit lassen sich die zeitlich zurückliegenden Erscheinungsjahre erklären. Weiterführende neuere Literatur ist nur vermerkt, wenn damit ein nennenswerter Erkenntniszugewinn verbunden war. Die Leser des Buches sollten keine umfangreiche Literaturrecherche erwarten.

Die Struktur und der Stil des Buches beruht auf seiner Herkunft aus einer Studien- und Arbeitsblattsammlung. Die Vermittlung von autonomen und anwendungsorientierten Kapiteln führt zu einer großen Informationsdichte mit textlichen, bildhaften und tabellarischen Darstellungen. Diese Form verlangt vom Leser technisch-naturwissenschaftliche Grundlagenkenntnisse, vermeidet aber bewusst eine umfangreiche Lehrbuchdarstellung.

Die Arbeitsunterlagen werden jeweils eingeführt durch Beschreibung des Anwendungsgegenstandes bzw. Geltungsbereiches mittels Basisdefinitionen sowie durch Angabe von Normen, Fachliteratur und sonstigen Quellen. Demonstrations- und Berechnungsbeispiele beziehen sich auf unterschiedliche Anwendungszeitebenen und betreffen nur einen kleinen Ausschnitt der Anwendungsmöglichkeiten. Die

Art der Darstellung soll zur strukturierten und algorithmischen Denk - und Arbeitsweise unterschiedlichen Umfangs anregen.

Berechnungsvorschriften werden durch Quellenangaben und Randbedingungen beschrieben, wobei detaillierte Ableitungen meist nicht angegeben sind. Diese Ableitungen können aber im Bedarfsfall mit üblicher Fachliteratur, Datensammlungen und den speziellen Quellenangaben nachvollzogen werden. Berechnungsergebnisse aus Aufgabenstellungen zur Entwicklung und Konstruktion von Kunststoffteilen sind im Vergleich zum Einsatz anderer Werkstoffe (z. B. Stähle) häufig relativ ungenau. Dies resultiert vor allem aus den Streubereichen der Werkstoffdaten infolge komplexer Einflüsse, so dass auch ein gesteigerter Berechnungsaufwand meist nicht sinnvoll ist. Der Autor empfiehlt daher Grenzwertabschätzungen (Maximum-Minimum-Methode), die in vielen Fällen praktisch sinnvolle Entscheidungen ermöglichen. In Zweifelsfällen müssen dann Entscheidungen ohnehin durch praxisnahe Experimente und Erprobungen unterstützt werden, sofern dies wirtschaftlich und aus Sicherheitsgründen geboten ist.

Bei der Nutzung der Anwendungsunterlagen ist zu beachten, dass gleiche Kurzzeichen u. U. unterschiedliche Sachverhalte bzw. Dateninhalte bezeichnen, da technische Normen und Anwendungsvorschriften dies erfordern (z. B. Stabilitätsrechnung; Zahnradberechnung; Wärmeübertragung). Unterschiedliche inhaltliche Zuordnungen zu gleichen Kurzzeichen sind u. U. sogar in Abschnitten des gleichen Kapitels zu beachten (z. B. Kapitel 5).

Kunststoffwerkstoffe werden im Buch mit normierten bzw. üblichen Kurzzeichen bezeichnet. Nur in Ausnamefällen werden Handelsnamen angegeben, sofern dies für die Spezifizierung der Kunststoffe hilfreich ist. Davon unberührt ist die Notwendigkeit der detaillierten Typangabe (Liefernomenklatur) des konkreten Kunststoffs in der Konstruktionsdokumentation der Kunststoffteile.

Wesentliche Teile des Buchinhalts stehen als Windows-Software der Makrolar GbR Berlin zur Verfügung, an deren Entwicklung und Vertrieb Dipl.- Ing. Frank Neumann entscheidend beteiligt war und ist. Aus der langen Zusammenarbeit mit Herrn Neumann ergaben sich viele dankenswerte Impulse für die Arbeit am vorliegenden Buch.

Der Autor möchte sich beim Hanser Verlag für die Herausgabe des Buches bedanken. Insbesondere gilt mein Dank den Lektoren Herrn Dr. Smith und Frau Wittmann und dem für die Herstellung zuständigen Herrn Strohbach, die mich durch geduldige und kreative Zusammenarbeit unterstützten.

Januar 2021

*Prof. Dipl.-Ing. B.-R. Meyer*

# Der Autor

Herr Prof. Meyer ist Chemieingenieur für Kunststofftechnologie (Ing.-Schule Fürstenwalde), Diplomingenieur für Maschinenbau und Fertigungstechnik mit Spezialisierung Kunststofftechnik (TU Dresden) und hat einen Diplomabschluss in Fachschulpädagogik (TU Dresden).

Er war in der Industrie als Spritzgießtechnologe und als Abteilungsleiter Forschung und Entwicklung für Kunststoffanwendung in der Kältetechnik tätig.

An der Ing.-Schule Fürstenwalde war er Dozent und Fachgruppenleiter für Kunststofftechnik und im Studiengang Kunststofftechnik an der TH Wildau hat er eine Professur geleitet.

Des Weiteren ist er Gesellschafter der Makrolar GbR Berlin für Entwicklung und Vertrieb kunststofftechnischer Software.

Herr Prof. Meyer war Mitglied des Fachausschusses „Toleranzen für Kunststoff-Formteile“ des DIN-Institut Berlin zu Erarbeitung der DIN 16742 als Nachfolgenorm von DIN 16901.



Prof. Dipl.-Ing. B.-R. Meyer



# 1

# Struktur – Eigenschaftsbeziehungen der Polymere

## ■ 1.1 Übersichten

### Einführung

Die Eigenschaften von Stoffen lassen sich aus ihrer Struktur ableiten. Polymere besitzen die größte Strukturvielfalt der von Menschen genutzten Werk- und Funktionsstoffe. Die Beschreibung der Zusammenhänge zwischen stofflicher Struktur und Eigenschaften dient als werkstofftechnische Grundlage für die nachfolgenden Kapitel.

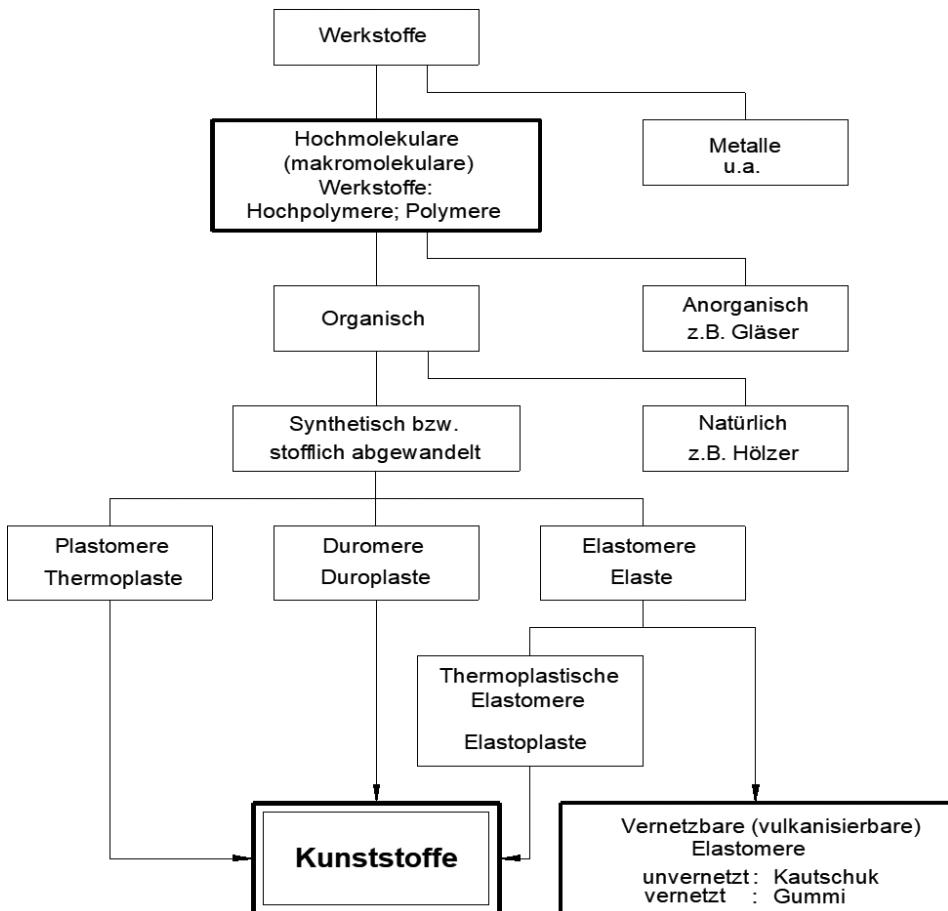
Die wichtigsten Quellen des vorliegenden Kapitels sind folgende Veröffentlichungen:

Meyer, B.-R.: Werkstoffkunde der Kunststoffe. In: Saechting - Kunststofftaschenbuch, Carl Hanser Verlag, 26. Ausgabe 1995 ff.

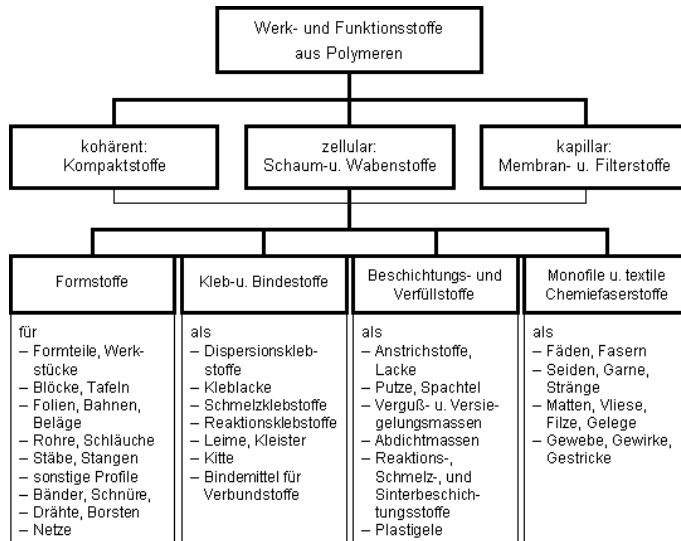
Meyer, B.-R.: Kunststoffeigenschaften und deren Einfluss auf die Formteile unter Berücksichtigung der Maßhaltigkeit. In: Maßhaltige Kunststoff-Formteile, Carl Hanser Verlag, München 2013/2019.

Erforderlichenfalls werden weitere Quellen in den jeweiligen Abschnitten zitiert.

## Einordnung der Kunststoffe



Einordnung der Kunststoffe in das Werkstoffgebiet



Einordnung polymerer Werk- und Funktionsstoffe nach Makrostruktur und Anwendung

Normen zur Kennzeichnung von Polymeren (Benennung und Kurzzeichen)	
DIN EN ISO 1043-1	Basis-Polymeren und ihre besonderen Eigenschaften
DIN EN ISO 1043-2	Füllstoffe und Verstärkungsstoffe
DIN EN ISO 1043-3	Weichmacher
DIN EN ISO 1043-4	Flammschutzmittel
DIN EN ISO 18064	Thermoplastische Elastomere
DIN ISO 1629	Kautschuk und Latices
DIN EN ISO 11469	Kunststoffe – Sortenspezifische Identifizierung und Kennzeichnung von Kunststoff-Formteilen
DIN EN ISO 472	Kunststoffe – Fachwörterverzeichnis

## Eigenschaftsprüfung der Polymere

Die Eigenschaftsprüfung und damit die Angabe entsprechender Vorschriften und Normen ist nicht Gegenstand dieses Kapitels. Diesbezüglich sei auf Kapitel 2 „Systematische Kunststoffauswahl für Formstoffe“ verwiesen.

## ■ 1.2 Konstitution und Konfiguration der Makromoleküle

### 1.2.1 Zusammensetzung, Größe und Gestalt der Makromoleküle

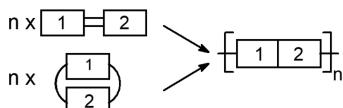
#### Molekülzusammensetzung der Polymere

Am atomaren Aufbau der Polymermoleküle sind hauptsächlich die Nichtmetallelemente Kohlenstoff (C), Wasserstoff (H) und Sauerstoff (O) beteiligt. Relativ häufig treten noch Stickstoff (N), Chlor (Cl), Fluor (F) und Schwefel (S) auf. Wegen ihrer Ähnlichkeit zu biologischen Molekülen werden diese als organische Verbindungen bezeichnet. Sogenannte halborganische Verbindungen (z.B. Silikone) enthalten auch Silizium (Si). Die chemische Hauptvalenzbindung zwischen den Atomen wird durch die Elektronenpaarbindung (Atombindung, Kovalente Bindung) bewirkt. In Sonderfällen spielt die Ionenbindung (Ionomere) eine Rolle.

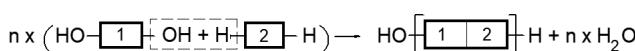
Organische Polymere werden synthetisch hergestellt (meist aus dem Rohstoff Erdöl) oder aus Biopolymeren (z.B. Stärke, Cellulose, Eiweiß) stofflich abgewandelt.

#### Polymerbildungsreaktionen

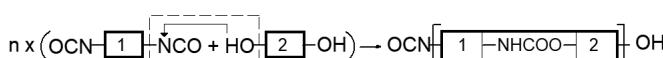
**Polymerisation:** Monomere verknüpfen sich durch Aufspaltung von Mehrfachbindungen oder Ringöffnung über eine Kettenreaktion zu Polymerisaten.



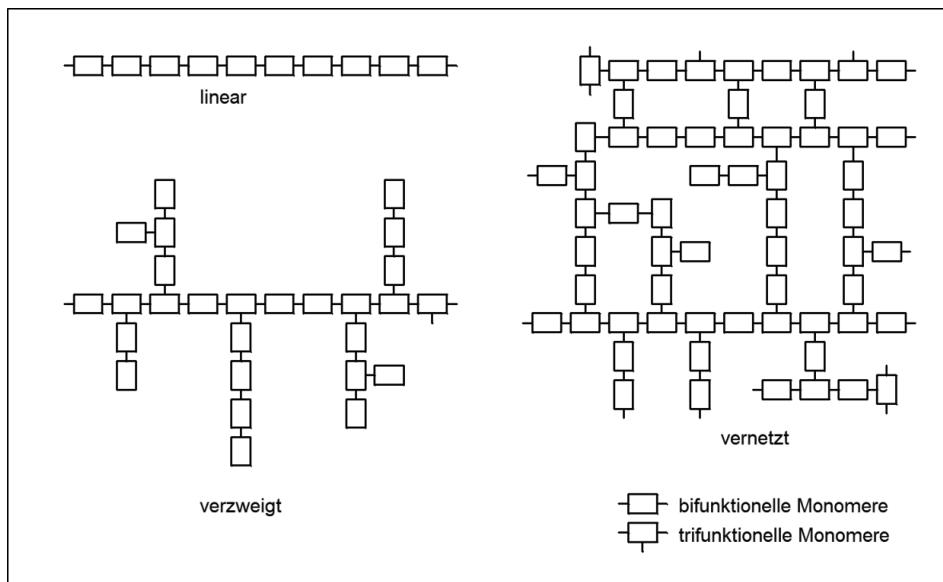
**Polykondensation:** Monomere verknüpfen sich durch Abspaltung von Reaktionsprodukten (z. B. Wasser) über eine Stufenreaktion zu Polykondensaten (z. B. Veresterung).



**Polyaddition:** Monomere verknüpfen sich durch intermolekulare „Wanderung“ eines Wasserstoffatoms ohne Abspaltung von Reaktionsprodukten über eine Stufenreaktion zu Polyaddukten (z. B. Urethanreaktion).



## Kovalente Grundstrukturen von Polymeren



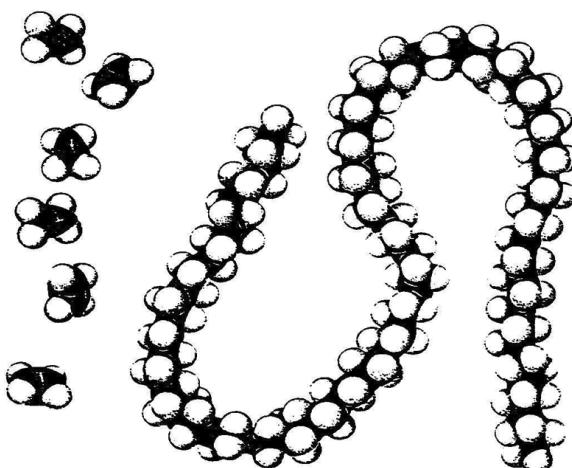
## Konstitution thermoplastischer Copolymeren

Random- oder statistische Copolymeren		Statistische Monomeranordnung
Sequenz-Copolymeren	$[-\square-\blacksquare-]_n$ $[-\square-\square-\blacksquare-]_n$	Periodische Anordnung von Monomersequenzen
Segmentblock-Copolymeren	$[-(\blacksquare)_x (\square)_y -]_n$	Segmentierte Anordnung von homopolymeren Molekülblöcken
Teleblock-Copolymeren	$[-\square-]_x [-\blacksquare-]_y [-\square-]_x$ $[-\square-]_x [-\square-\blacksquare-\blacksquare-]_y [-\square-]_x$	Anordnung von endständigen Molekülblöcken gleicher Monomerart an einem homo- oder copolymeren Mittelblock
Pfropf-Copolymeren		Aufpfropfen von Molekülblöcken auf einen Basisblock zu verzweigten Makromolekülen

Nach der Anzahl unterschiedlicher Monomerarten werden u. a. Bi-, Ter-, Quater-Copolymere unterschieden  
 Block-Copolymere werden nach der Anzahl der molekülbildenden Blöcke in Di-, Tri-, Tetra-, usw. -Block-Copolymeren unterschieden

## Moleküllängenrelation von Polymeren

Polymere bestehen aus Makromolekülen, die aus gleichartigen oder verschiedenen Monomeren aufgebaut sind. Für technisch genutzte, unvernetzte Polymere ergeben sich bei angenommenen Molekülfadendicken von 1 mm etwa 2 m bis 200 m gestreckte Moleküllängen mit unterschiedlicher Längenverteilung. Es handelt sich im wahrsten Sinne um Riesenmoleküle.



### Molekülmassen von Polymeren

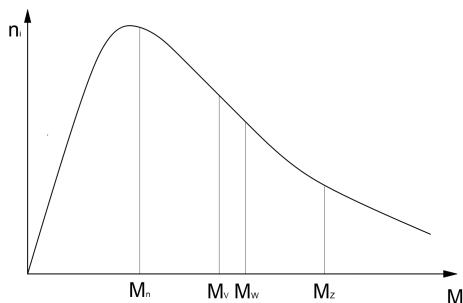
$6 \times 10^{23}$  Moleküle eines Stoffes (1 mol) wiegen:

- **bei niedermolekularen Stoffen:**
  - wie 2 g H<sub>2</sub> oder
  - wie 18 g H<sub>2</sub>O oder
  - alle anderen niedermolekularen Stoffe bis 500 g/mol
- **bei Oligomeren<sup>1)</sup>:** über 0,5 bis 10 kg/mol
- **bei Polymeren<sup>2)</sup>:**
  - übliche Thermoplaste über 10 kg/mol bis 1 t/mol oder
  - Spezial- und Biopolymere über 1 t/mol

<sup>1)</sup> Oligomere sind Vorstufenverbindungen echter Polymere.

<sup>2)</sup> Bei Duroplasten und Gummi ist die Angabe von Molekülmassen wegen der Molekülvernetzung nicht sinnvoll bzw. nicht möglich.

### Molekülmasseverteilung (Polymolekularität) und Molekülmassemittelwerte von Polymeren



$n_i$ : Molekülanzahl einer Molekülfraktion

$M_i$ : Molekülmasse der Molekülfraktion

$M_n$ : Zahlenmittelwert

$M_w$ : Gewichtsmittelwert

$M_v$ : Viskositätsmittelwert

$M_z$ : Zentrifugenmittelwert

Vielfalt und Streubreite der Molekülmasse sowie die daraus je nach Prüfverfahren abgeleiteten Molekülmassemittelwerte definieren komplexe Einflüsse auf das Fließverhalten (Rheologie) sowie auf thermische und mechanische Eigenschaften. Die Uneinheitlichkeit  $U$  ist als Maß der Streubreite der Molekülmassen quantifizierbar:

$$U = \frac{M_w}{M_n} - 1$$

### Verzweigung und Steifheit der Makromoleküle

Die Beweglichkeit der Makromoleküle ist von entscheidender Bedeutung für die Stoffeigenschaften. Sie wird erheblich durch die Molekülgestalt beeinflusst. Aspekte dieser Gestalteinflüsse werden nachstehend schematisch dargestellt:

Verzweigungsarten	
	unverzweigt
	kammartig, kurzkettig
	kammartig, langkettig
	strauchartig

Molekülsteifheit	
	Kleine symmetrische Molekülsegmente sind über Einfachbindungen frei beweglich, z. B. PE, PTFE, POM
	Behinderte Drehbarkeit der Molekülsegmente durch Mehrfachbindungen, z. B. BR, TOR
	Großvolumige (sperige) Substituenten ergeben einfach- und doppelt-asymmetrische Molekülsegmente mit eingeschränkter Beweglichkeit, z. B. PS, PC, PPS, PSU

Molekülsteifheit	
	Verknüpfungen von Ringstrukturen nach dem Leiterprinzip ergeben starre Molekülsegmente, z. B. LCP
	Extreme Bewegungseinschränkungen bei durchgängiger Leiterstruktur, z. B. Polyaramide

## 1.2.2 Zwischenmolekulare Kräfte (ZMK)

Wenn für den Zusammenhalt der Moleküle nur chemische Hauptvalenzbindungen zuständig wären, müssten alle niedermolekularen organischen Stoffe bei Raumtemperatur gasförmig sein, d. h. die kondensierten Zustände (flüssig, fest) sind damit nicht erkläbar. Tatsächlich wirken bei allen Stoffen mit kovalenter Atombindung noch zwischenmolekulare Kräfte (ZMK), die durch elektrostatische Anziehung infolge temporärer oder permanenter Ladungsdifferenzen zwischen Atomen oder Molekülteilen wirksam sind.



Generell haben ZMK geringere Bindungsenergien als kovalente Atombindungen.

Die Wirksamkeit der ZMK erfordert eine Mindestannäherung der Molekülteile, die bei zunehmender Wärmebewegung infolge Temperaturerhöhung mehr oder weniger behindert bzw. aufgehoben wird. Die Gesamtheit aller wirksamen Einzelkräfte der ZMK ist die **Molkohäsion** der Stoffe, welche für die davon abhängigen makroskopischen Eigenschaften maßgebend ist.

Nachfolgend werden die für Polymere wichtigsten ZMK stichpunktartig beschrieben:

- **Dispersionskräfte:**

- Allseitig wirksame, ungerichtete Anziehung zwischen fluktuiierenden Ladungsschwerpunkten von Atomorbitalen (temporäre Atomdipole). Dispersionskräfte sind bei allen Stoffen mit einem gleichförmigen Kraftfeld schwächer Wechselwirkungen wirksam. Temperatureinfluss gering. Beitrag zur Molkohäsion meist groß.

#### ■ Induktionskräfte:

- Wenig gerichtete, induzierte Anziehung zwischen permanenten Molekülguppependipolen und polarisierbaren Molekülteilen mit „verschiebbaren“ Elektronen (z. B.  $\pi$ -Elektronen in Aromaten und in konjugierten Mehrfachbindungen). Temperatureinfluss und Beitrag zur Molkohäsion meist gering.

#### ■ Dipol- oder Orientierungs Kräfte:

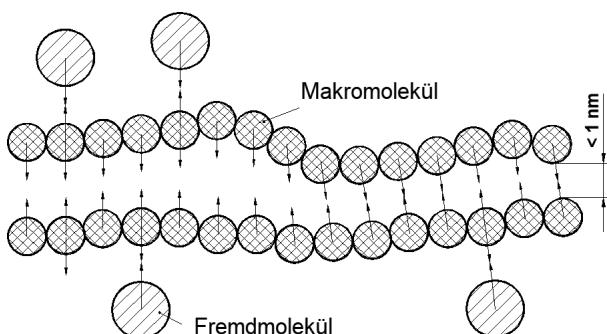
- Gerichtete Anziehung zwischen permanenten Molekülguppepdipolen. Temperatureinfluss auf die Richtkraftwirkung groß. Beitrag zur Molkohäsion abhängig von Dipolkonzentration und Dipolstärke, u.U. groß.

#### ■ Wasserstoffbrückenkräfte:

- Gerichtete Anziehung zwischen speziellen permanenten Molekülgruppendipolen, die einerseits als Protonendonator mit „verschiebbaren“ H-Atomen (X-H) und andererseits als Protonenakzeptor (Y) wirken: X-H ... Y. Temperatureinfluss und Beitrag zur Molkohäsion u. U. sehr groß. Die Ladungsausrichtung kann bis zur Vorstufe einer Ionenbindung führen.

Es sei vermerkt, dass für ZMK unterschiedliche Begriffe und Zuordnungen verwendet werden, auf die hier nicht eingegangen wird. Sind ausschließlich Dispersionskräfte ohne messbares Dipolmoment wirksam, werden diese Stoffe als unpolar eingestuft. Stoffe mit messbaren Dipolmomenten infolge wirksamer Richtungskräfte (Induktions-, Dipol- und Wasserstoffbrückenkräfte) werden als polar bezeichnet, wobei stoffabhängig das Ausmaß der Polarität sehr unterschiedlich sein kann.

Bei der Wechselwirkung unterschiedlicher Stoffe miteinander spielen die ZMK u.U. eine entscheidende Rolle bezüglich Mischbarkeit, Löslichkeit Quellbarkeit, Medienaufnahme, Benetzbarekeit, Permeation, Weichmacherwirksamkeit, Wärmeformbeständigkeit, dielektrische Verluste und anderer Eigenschaften. Beispielsweise nehmen unpolare Polymere kein (polares) Wasser auf und haben sehr geringe dielektrische Verluste.



## 1.2.3 Chemische Struktur thermoplastischer Polymere

### 1.2.3.1 Polymethylene

Polyethylen (PE)	$\left[ \text{CH}_2 - \text{CH}_2 \right]_n$	
Polyvinyle	$\left[ \text{CH}_2 - \underset{\text{R}}{\overset{ }{\text{CH}}} \right]_n$	
R:	$\begin{array}{l} \text{---CH}_3 \\ \text{Polypropylen (PP)} \end{array}$ $\begin{array}{l} \text{---C}_2\text{H}_5 \\ \text{Polybuten-1 (PB)} \end{array}$ $\begin{array}{l} \text{---} \text{C}_6\text{H}_5 \\ \text{Polystyrol (PS)} \end{array}$	
$\begin{array}{c} \text{CH}_3 \\   \\ \text{---CH}_2 - \text{CH} \\   \\ \text{CH}_3 \end{array}$	$\begin{array}{c} \text{CH}_3 \\   \\ \text{---O --- CH}_2 - \text{CH} \\   \\ \text{CH}_3 \end{array}$	$\begin{array}{c} \text{---N} \\   \\ \text{---} \text{C}_6\text{H}_5 \end{array}$
Poly-4-methylpenten-1 (PMP)	Polyvinylisobutylether (PVBE)	Polyvinylcarbazol (PVK)
$\begin{array}{c} \text{CO} \quad \text{CH}_2 \\ \diagdown \quad / \\ \text{---N} \quad \text{CH}_2 - \text{CH}_2 \end{array}$	$\begin{array}{c} \text{---CN} \\ \text{Polyacrylnitril (PAN)} \end{array}$	$\begin{array}{c} \text{---OH} \\ \text{Polyvinylalkohol (PVAL)} \end{array}$
Polyvinylpyrrolidon (PVP)	$\begin{array}{c} \text{---O --- COCH}_3 \\ \text{Polyvinylacetat (PVAC)} \end{array}$	$\begin{array}{c} \text{---COOC}_4\text{H}_9 \\ \text{Polybutylacrylat (PBA)} \end{array}$
$\begin{array}{c} \text{CH}_2 - \text{CH}_2 \\   \quad \backslash \\ \text{---CH} \quad \text{CH}_2 - \text{CH}_2 \end{array}$	$\begin{array}{c} \text{---Cl} \\ \text{Polyvinylchlorid (PVC)} \end{array}$	$\begin{array}{c} \text{---F} \\ \text{Polyvinylfluorid (PVF)} \end{array}$
Polyvinylcyclohexan (PVZH)		
Polyvinylidene	$\left[ \text{CH}_2 - \underset{\text{R}}{\overset{ }{\text{C}}} \underset{\text{R}}{\overset{ }{\text{C}}} \right]_n$	R:
		$\begin{array}{l} \text{---Cl} \\ \text{Polyvinylidenchlorid (PVDC)} \end{array}$ $\begin{array}{l} \text{---F} \\ \text{Polyvinylidenfluorid (PVDF)} \end{array}$
Polymethylvinyle	$\left[ \text{CH}_2 - \underset{\text{R}}{\overset{ }{\text{C}}} \text{CH}_3 \right]_n$	R:
		$\begin{array}{l} \text{---CH}_3 \\ \text{Polyisobuten (PIB)} \end{array}$ $\begin{array}{l} \text{---COOC}_2\text{H}_5 \\ \text{Polymethylmethacrylat (PMMA)} \end{array}$ $\begin{array}{l} \text{---} \text{C}_6\text{H}_5 \\ \text{Poly-}\alpha\text{-Methylstyrol (PMS)} \end{array}$
Perhalogenierte Polyvinyle	$\left[ \text{CF}_2 - \underset{\text{R}}{\overset{ }{\text{C}}} \text{F} \right]_n$	R:
		$\begin{array}{l} \text{---F} \\ \text{Polytetrafluorethylen (PTFE)} \end{array}$ $\begin{array}{l} \text{---Cl} \\ \text{Polychlortrifluorethylen (PCTFE)} \end{array}$ $\begin{array}{l} \text{---CF}_3 \\ \text{Polyhexafluorpropylen (PHFP)} \end{array}$ $\begin{array}{l} \text{---O --- Alkyl} \\ \text{Polyperfluoralkylether} \end{array}$
Polyvinylacetale	$\left[ \text{CH}_2 - \underset{\text{O --- R --- O}}{\overset{ }{\text{CH}}} - \text{CH}_2 - \underset{\text{O}}{\overset{ }{\text{CH}}} \right]_n$	R:
		$\begin{array}{l} \text{---CH}_2 \\ \text{Polyvinylformal (PVFM)} \end{array}$ $\begin{array}{l} \text{---C}_4\text{H}_7 \\ \text{Polyvinylbutyral (PVB)} \end{array}$

### 1.2.3.2 Polydiene, Polyalkenamere, Polycycloolefine (COC)

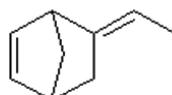
1,4-Polydiene	$\left[ \begin{array}{c} \text{CH}_2 - \underset{\substack{  \\ \text{R}}}{\text{C}} = \text{CH} - \text{CH}_2 \end{array} \right]_n$	R:	- H	Polybutadien (BR)
			- Cl	Polychloropren (CR)
			- CH <sub>3</sub>	Polyisopren (IR), Naturkautschuk (NR)

Polyalkenamere  $\left[ \text{CH} = \text{CH} - (\text{CH}_2)_x \right]_n$  z.B. x = 6: Polyoctenamer (TOR)

#### Polycycloolefine, Polycyclo diene

Homo- u. Copolymeren von Cycloolefinen, auch zusammen mit anderen Monomeren, zur Herstellung unterschiedlicher Thermoplaste, Elastomere und Duramere.

### Cycloolefins



Norbomen (N) Ethyldennorbomen (EN) Dicyclopentadien (DCP)

### 1.2.3.3 Polyacetale, Polyether, Polyarylether, Polyaryletherketone

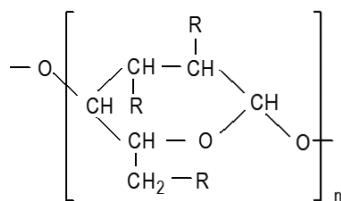
Polyacetale	$\left\{ \text{CH}_2 - \text{O} \right\}_n$	$\left[ \begin{array}{c} \text{CH} & - \text{O} \\   & \\ \text{CH}_3 & \end{array} \right]_n$
Polyformaldehyd, Polyoxymethylen (POM)		Polyacetaldehyd

Polyether	$\left[ - \text{CH}_2 - \text{CH}_2 - \text{O} \right]_n$	$\left[ \begin{array}{c} \text{CH}_2\text{Cl} \\   \\ \text{CH}_2 - \text{C} - \text{CH}_2 - \text{O} \\   \\ \text{CH}_2\text{Cl} \end{array} \right]_n$
Polyethylenoxid (PEOX)		
Polypropylenoxid (PPOX)	$\left[ \begin{array}{c} \text{CH} - \text{CH}_2 - \text{O} \\   \\ \text{CH}_3 \end{array} \right]_n$	Poly-3,3-bis-chlormethyl-propylenoxid (PCPO)

Polyarylether	$\left[ \text{---} \text{C}_6\text{H}_4 \text{---} \text{O} \text{---} \right]_n$	$\left[ \text{---} \text{C}_6\text{H}_3(\text{CH}_3)_2 \text{---} \text{O} \text{---} \right]_n$
Polyphenylether		Poly-2,6-dimethylphenylenether (PPE)

Benennung nach Aufeinanderfolge der E- u. K-Gruppen  
Beispiele: PEK, PEEK, PEKK, PEEKKK, PEKEKK

### 1.2.3.4 Cellulosederivate



**Cellulosederivate** sind durch Substitutionsart und Umsetzungsgrad der Hydroxylgruppen ( $R = -OH$ ) der nativen Cellulose bzw.  $\alpha$ -Cellulose sowie durch deren spezielle Präparation darstellbar.

#### Celluloseester R

$-O-COCH_3$	$-O-COCH_3$ (vollst. subst.)
Celluloseacetat (CA)	Cellulosetriacetat (CTA)
$-O-COC_2H_5$	$-O-COCH_3$ u. $-O-COC_2H_5$
Cellulosepropionat (CP)	Celluloseacetopropionat (CAP)
$-O-COCH_3$ u. $-O-COC_3H_7$	$-O-NO_2$
Celluloseacetobutyrat (CAB)	Cellulosenitrat (CN)

#### Celluloseether R

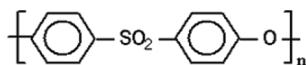
$-O-CH_3$	$-O-C_2H_5$
Methylcellulose (MC)	Ethylcellulose (EC)
$-O-CH_2-\text{C}_6H_4-$	$-O-CH_2COOH$
Benzylcellulose (BC)	Carboxymethylcellulose (CMC)

#### Mercerisierte<sup>3</sup> Cellulose

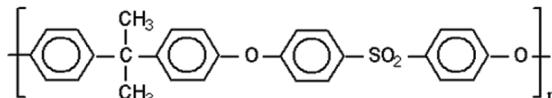
- Hydratcellulose, Cellulosehydrat, Zellglas (CH)
- Pergamentierte Hydratcellulose, Vulkanfiber (VF)

<sup>3)</sup> Die Mercerisation (Mercerisation) ist ein Veredlungsverfahren für Baumwolle

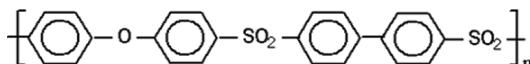
### Polyarylethersulfone, Polyarylsulfide



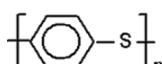
Polyethersulfon (PES)



Bisphenol A-Polyethersulfon (PSU)



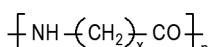
Polyphenylenethersulfon (PPSU)



Polyphenylensulfid (PPS)

### 1.2.3.5 Polyamide (PA) und lineare Polyurethane (PUR)

#### Homopolyamide aus Aminosäuren oder deren Lactame



Beispiele	PA <sub>Z</sub>
Polycaprolactam	PA6
Poly 11aminoundecanamid	PA11
Polylaurinlactam	PA12

Z = C-Zahl der C Aminosäure bzw. des Lactams (Z = x+1)

#### Aliphatische Homopolyamide aus unverzweigten Diaminen u. Dicarbonsäuren

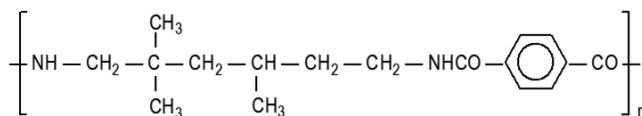


Beispiele	PA <sub>Z1Z2</sub>
Polytetramethyleneadipinamid	PA46
Polyhexamethyleneadipinamid	PA66
Polyhexamethyleneacetainamid	PA69
Polyhexamethylensebacinamid	PA610
Polyhexamethylendodecanamid	PA612

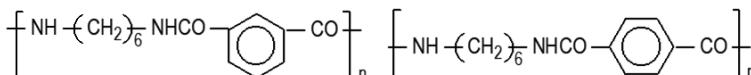
Z1= C-Zahl des Diamins (Z1 = x)

Z2= C-Zahl der Dicarbonsäure (Z2 = y+2)

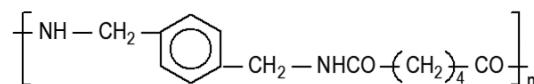
### Aromatische Homopolyamide (Polyarylamide)



Polytrimethylhexamethyleneterephthalamid (PANDT (PA6-3-T))



Polyhexamethylenisophthalamid (PA6I) Polyhexamethyleneterephthalamid (PA6T)



Poly-m-xylylenadipinamid (PAMXD6)

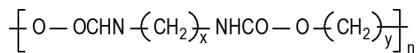
Kurzzeichenbildung wie aliphatische Polyamide, wobei für verzweigte aliphatische Diamine sowie für aromatische Diamine und Dicarbonsäuren Buchstabsensymbole nach ISO 1874 festgelegt sind.

### Copolyamide

Kurzzeichenbildung für Copolymere nach ISO 1043/DIN 7728 aus den monomeren Coreaktanten

*Beispiele:* PA6/12; PA6/69; PA66/6; PA66/610; PA6/6T; PA12/MACMI; PA12/IPDI; PA6I/MACMT; PA6T/6I; PA6T/IPDI/6

### Polyurethane aus aliphatischen Diisocyanaten und Diolen

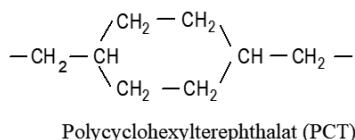
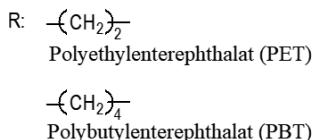
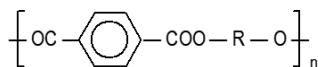


x = 6: 1,6-Hexamethylendiisocyanat

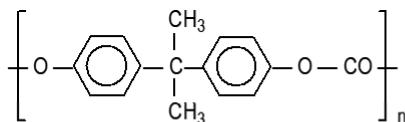
x = 4: 1,4-Butandiol

### 1.2.3.6 Lineare Polyarylester:

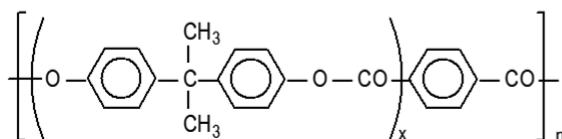
#### Polyalkylenterephthalate



#### Polycarbonate

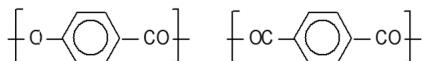
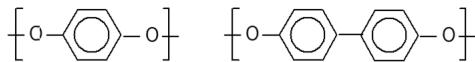


BisphenolA-Polycarbonat (PC)



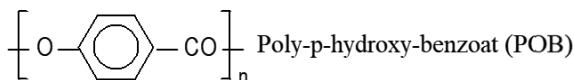
Polyterephthalsäure-estercarbonat (PEC)

#### Polyhydroxybenzoate

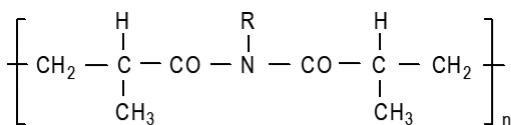


Homo- u. Copolyester von Benzoesäurederivaten mit Strukturelementen unterschiedlichster Anordnung.

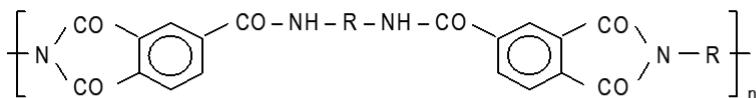
In Verbindung mit aliphatischen Strukturen (Spacer) auch Basis für flüssigkristalline Polymere (LCP).



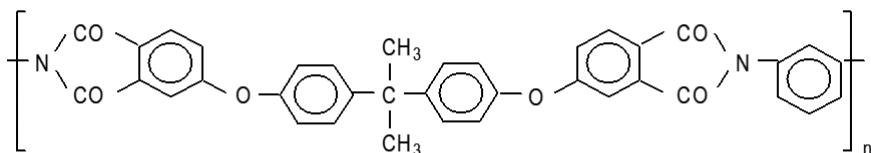
### 1.2.3.7 Polyimide (PI)



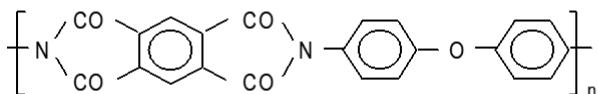
Polymethacrylimid (PMI)



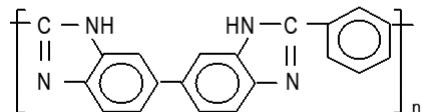
Polyamidimid (PAI)



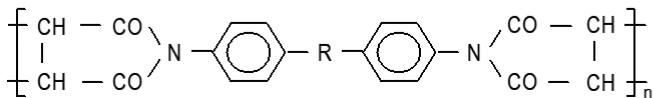
Polyetherimid (PEI)



Polydiphenyloxidpyromellithimid (PPI)



Polybenzimidazol (PBI)



Polybismaleinimid (PBMI)

## 1.2.4 Nomenklatur und Kurzzeichen spezieller Polymergruppen

### Duroplastharze

Duroplaste werden durch engmaschige chemische Vernetzung aus härtbaren Kunstharzen hergestellt. Nachstehend soll durch eine Benennung wichtiger Vertreter die stoffliche Vielfalt dieser Polymergruppe veranschaulicht werden.

Kurzzeichen	Harzbasis	Kurzzeichen	Harzbasis
PF	Phenol – F.	EP	Epoxid
CF	Kresol – F.	VE	Vinylester
CSF	Kasein – F.	PDAP	Polydiallylphthalat
UF	Harnstoff – F.	KW-X	Kohlenwasserstoff
MF	Melamin – F.	SI-X	Silikon
MPF	Melamin-Phenol – F.	PUR-X	Polyurethan
UP	Ungesättigte Polyester	PBI-X	Polybenzimidazol
(MF+UP)	Blend (IPN)	PBMI-X	Polybismaleinimid

Hinweise: F. = Formaldehyd X = vernetzbar

**Phenoplaste:** Duroplaste aus Phenolen und Aldehyden.

**Aminoplaste:** Duroplaste aus Harnstoff, Melamin, Anilin und Aldehyden.

Kurzzeichen für ausgewählte Kautschuke	
<b>ABR</b> Acrylester-Butadien-Kautschuk	<b>IIR</b> Butylkautschuk (Isobutylens/Isopren)
<b>ANM</b> Acrylat-Acrylnitril-Kautschuk	<b>IR</b> Isoprenkautschuk (Polyisopren)
<b>BR</b> Butadienkautschuk (Polybutadien)	<b>NR</b> Naturkautschuk (nat. Polyisopren)
<b>CR</b> Chloroprenkautschuk (Polychloropren)	<b>SBR</b> Styrol-Butadien-Kautschuk
<b>CSM</b> Sulfonylchloridkautschuk (Chlorsulfonierte Polyethylen)	<b>TM</b> Polysulfidkautschuk (Thioplast)
<b>EPDM</b> Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk	<b>TOR</b> Octenamerkautschuk (Polyoctenamer)

**R (Rubber)** für ungesättigte Kohlenstoffketten

**M (Methylen)** für gesättigte Kohlenstoffketten

Kurzzeichen für ausgewählte thermoplastische Copolymerne	
<b>ABS</b> Acrylnitril-Butadien-Styrol	<b>ETFE</b> Ethylen-Tetrafluorethylen
<b>AMMA</b> Acrylnitril-Methylmethacrylat	<b>MABS</b> Methylmethacrylat-Acrylnitril-Butadien-Styrol
<b>ASA</b> Acrylnitril-Styrol-Acrylester	<b>PA66/6</b> Copolyamid aus PA66 und PA6
<b>CAB</b> Celluloseacetobutyrat	<b>PA6/12</b> Copolyamid aus PA6 und PA12
<b>COC</b> Cyclopolyolefin	<b>SB</b> Styrol-Butadien
<b>EVAC</b> Ethylen-Vinylacetat	<b>VCVDC</b> Vinylchlorid-Vinylidenchlorid

***Teleblockcopolymere***

- **TPS-SBS** Styrol-Butadien-Styrol
- **TPS-SEPS** Styrol-Ethylen/Propylen-Styrol
- **TPS-SEBS** Styrol-Ethylen/Buten-Styrol
- **TPS-SIS** Styrol-Isopren-Styrol

***Segmentblockcopolymere***

- Basistypen
  - **TPA** Copolymere
  - **TPC** Copolyester
  - **TPU** Copolyurethane
    - Hartsegment: **TPU-AR** Aromatisch
    - Hartsegment: **TPU-AL** Aliphatisch
- Weichsegmente
  - **ES** Ester
  - **ET** Ether
  - **EE** Ester/Ether
  - **CE** Carbonat
  - **CL** Caprolacton
- Handelstypen
  - TPA-EE/ES/ET
  - TPC-EE/ES/ET
  - TPU-AREE/ARES/ARET
  - TPU-ARCE
  - TPU-ARCL
  - TPU-ALES/ALET

## ■ 1.3 Konformation und Aggregation der Makromoleküle

### 1.3.1 Einführung

Die folgenden Betrachtungen befassen sich mit dem Ordnungs- und Bewegungszustand der Makromoleküle (morphologische Struktur) bei vorgegebener chemischer

Struktur. Hierbei werden äußere Einflüsse durch Temperaturänderung (Wärmebewegung) und Kraftwirkungen (Deformation) berücksichtigt.

Bei niedermolekularen Stoffen im Festzustand sind die zwischenmolekularen Kräfte ZMK auf Grund des geringen Molekülabstandes voll wirksam und erreichen den Zustand geringster innerer Energie (dichteste „Molekülpackung“) durch Ordnungs erhöhung der Moleküle als entscheidende Triebkraft.

Das Ausmaß der Molekülbewegung ist erheblich eingeschränkt. Stehen dabei nur unmittelbar benachbarte Moleküle in Kontakt (Nahordnung), liegt ein ungeordneter amorpher Zustand vor. Durch gleichförmige Aggregation aller Moleküle (Fernordnung) wird der kristalline Zustand als maximales Ordnungsgefüge erreicht.

Im gasförmigen Zustand sind die Molekülabstände so groß, dass die ZMK mit zunehmender Temperatur ihre Wirkung verlieren und die Moleküle in ihrer Gesamtheit sich gleichmäßig im verfügbaren Volumen verteilen. Sie streben den Zustand maximaler Entropie („Molekülnordnung“) als entscheidende Triebkraft zur Verringerung der freien Energie des Stoffsystems an.

Das vorstehend vereinfacht beschriebene Szenario der Molekülbewegung ist die Konsequenz des allgemeingültigen Naturgesetzes (2. Hauptsatz), dass alle sich selbst überlassene Systeme bei konstantem Druck und Volumen spontan versuchen, möglichst einen Gleichgewichtszustand geringster freier Energie durch Verringerung der inneren Energie (= Ordnungs erhöhung) und durch Erhöhung der Entropie (= Ordnungsverringerung) zu erreichen.

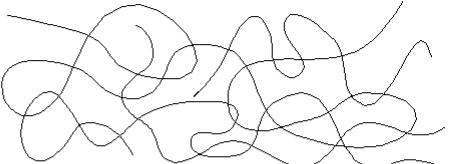
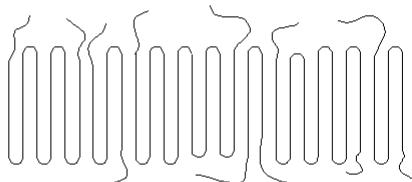
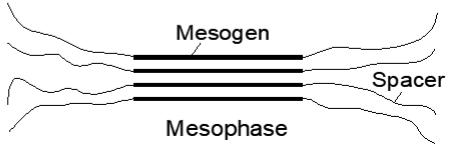
Welche der beiden entgegengesetzt gerichteten Triebkräfte in welchem Ausmaß die Bewegung und den Ordnungsgrad der Moleküle bestimmen, hängt von den äußeren und inneren Bedingungen des Stoffsystems (Molekülgestalt, Molekülmasse und deren Verteilung, Molkohäsion, Temperatur, äußere Krafteinwirkungen, verfügbare Zeit zur Ordnungsänderung u.a.) ab.

Naturgemäß gelten die vorstehend aufgeführten Gesetzmäßigkeiten auch für makromolekulare Stoffe. Auf Grund der langen Moleküle ergeben sich aber neue Bewegungskonformationen. Die Makromoleküle können sich in unterschiedlich großen Molekülsegmenten bewegen, ohne die relative Lage des Gesamt moleküls zu verändern (Modell: ungeordnete Schlangenbewegung von Glieder- oder Perlenketten). Das bedeutet, dass sich Zusammenlagerungen (Molekülordnungen) nur auf Teilzonen des Makromoleküls erstrecken können. Beispielsweise ist daher nur Teilkristallinität bei Polymeren möglich. Die kristallinen Bereiche haben eine deutlich höhere Dichte als die amorphen Anteile. Die partielle Bewegung von Molekülsegmenten wird mikrobrownsche Molekularbewegung genannt, um sie von der Lageänderung ganzer Makromoleküle, der makrobrownschen Molekularbewegung, abzugrenzen. Ein gasförmiger Zustand ist für organische Polymere nicht erreichbar, da bei den dafür erforderlichen Temperaturen die kovalenten Atombindungen aufbrechen und damit deren Existenzbereich durch Zersetzung begrenzt ist.

Konformationsänderungen von Makromolekülen erfordern um mehrere Größenordnungen längere Zeiten als bei niedermolekularen Stoffen. Fehlen diese bei molekularen Umordnungsprozessen, entstehen die für Polymere typischen Nichtgleichgewichtszustände in der Stoffstruktur, die sich auch in einer inhomogenen Verteilung der Strukturphasen äußern. Eindeutige Stoffphasengrenzen fehlen daher bei Polymeren. Diese „Vorgeschichte“ der Strukturbildung beeinflusst u.U. erheblich die makroskopischen Eigenschaften der Kunststoffe.

### 1.3.2 Molekulare und morphologische Ordnungsstrukturen

Zur Strukturbeschreibung wird der Festkörper bei „eingefrorener“ mikrobrown-sche Molekularbewegung vorausgesetzt, wobei zunächst der **Nahordnungsbereich der Moleküle** betrachtet wird:

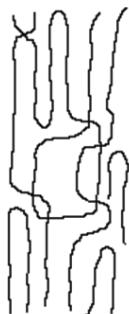
Phase	Struktur
amorph	 Knäuel
kristallin	 Lamelle
	 Mizelle
mesomorph	 Mesogen         Spacer         Mesophase

### Amorph

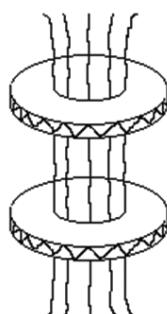
Sind die Moleküle hinreichend beweglich aber durch unregelmäßige Konfiguration nicht optimal für eine enge „Molekülpackung“ geeignet, so wird bei entsprechend tiefer Temperatur der energieärmste Ordnungszustand durch maximale Entropie bestimmt. Es liegt eine amorphe Knäuel- oder Wattebausch-Struktur ohne Fernordnung vor. Werden bei höherer Temperatur oder in Lösung (Solvatation) die ZMK aufgehoben, d. h. die mikrobrownsche Molekülbewegung freigesetzt, ist diese amorphe Struktur für alle Polymere unabhängig von deren spezieller Struktur gültig.

### Kristallin

Sind die Makromoleküle sehr gleichmäßig aufgebaut und unterstützt ihre Konfiguration sowie die Stärke der ZMK eine enge Annäherung der Moleküle, so ist Kristallitbildung durch Erhöhung des Ordnungsgrades möglich. Bei hinreichend flexiblen Molekülen geschieht dies durch Parallelalagerung und Faltung (Lamellen), während bei sehr steifen Molekülen (z.B. Cellulose) nur eine Parallelalagerung möglich ist (Mizellen). Meist aggregieren die Kristallite zu **Überstrukturen**, deren häufigste Vertreter die Sphärolithe sind:



Fibrille



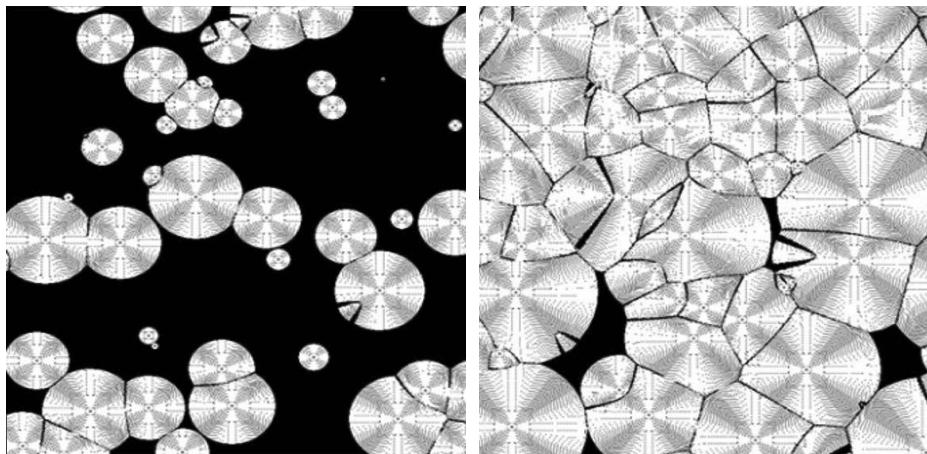
Shish-kebab



Sphärolith

Die Vielfalt der Molekülkonfigurationen sowie die Tendenz der Entropievergrößerung durch Molekülnäuelung lassen eine vollständige Kristallisation bei technischen Abläufen (Herstellung, Verarbeitung) nicht zu. Polymere sind daher immer nur teilkristallin mit unterschiedlichen Kristallisationsgraden und einer Mehrphasenstruktur aus amorphen und kristallinen Anteilen.

Die Kristallisation wird, wie auch bei niedermolekularen Substanzen, durch die Teilvergänge Keimbildung und Kristallwachstum bestimmt. Durch gezielte Steuerung der Erstarrungsbedingungen und/oder Zugabe feinverteilter Keimbildner (z.B. Nukleierungsmittel) kann eine möglichst homogene und feinkörnige Kristallitstruktur erzeugt werden, die z.B. für verschleißbeanspruchte und maßhaltige Kunststoffprodukte vorteilhaft ist.



Zufallsbedingtes Keimbildungswachstum

Gesteuertes Keimbildungswachstum

### Mesomorph

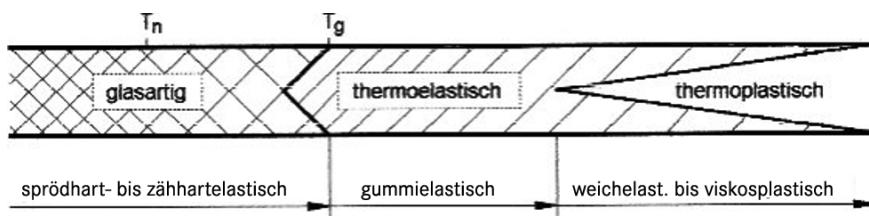
Extrem steife Moleküle (z. B. Leiterpolymere) sind weder zur Bildung einer amorphen Knäuelstruktur noch zur Kristallisation befähigt. Sie verhalten sich wie stabförmige Gebilde (Mesogene), die nur einen sehr geringen Freiheitsgrad der mikrobrownsschen Bewegung besitzen. Falls eine makrobrownssche Bewegung möglich ist, ordnen sie sich zu anisotropen Parallelstrukturen (Modell: Baumstämme im Fluss), die als Mesophasen bezeichnet werden. Zwischen den Mesogenen wirken zwar ZMK, deren Zusammenhalt aber nicht annähernd mit echten Kristallgitterstrukturen verglichen werden kann. Es liegt ein kristallähnlicher Zustand mit geringem Energieniveau vor. Realisiert man einen flüssigkeitsähnlichen Zustand, so bleibt die Mesophasenstruktur meist erhalten. Daher werden Polymere mit derartigen Strukturen als flüssigkristalline Polymere (liquid crystal polymers = LCP) bezeichnet. Da jede noch so geringe Molekülbewegung die Mesogene in Reck- oder Strömungsrichtung unidirektional orientiert und dadurch hochbelastbare anisotrope Strukturen erzeugt, spricht man auch von eigenverstärkenden Polymeren, deren Festigkeit aber senkrecht zur Orientierungsrichtung sehr gering ist. Die Mesophasenstruktur als Zwischenglied amorpher und kristalliner Struktur wird als mesomorph bezeichnet.

Durchgängige Leiterpolymere (z. B. Aramide) sind durch Erwärmung nicht plastizierbar, so dass ein flüssigkeitsähnlicher Zustand nur in Lösung (lyotrope LCP) erreicht wird. Sollen wärmeplastizierbare (thermotrope) LCP erzeugt werden, so kann dies durch Kombination von Leiterpolymeren mit flexiblen Molekülsegmenten, den sogenannten Spacern, erreicht werden.

### 1.3.3 Thermische Zustandsänderungen der Polymere

Die Zustandsänderungen bei Temperaturerhöhung werden hier so behandelt, als wären die Polymere Einphasensysteme. Die Überlagerung dieser Zustandsänderungen für reale Polymere ist Gegenstand eines weiteren Kapitels. Im Vergleich zu niedermolekularen Substanzen mit eindeutig bestimmbarer Zustandsänderung durch Schmelz- und Siedetemperaturen sind für Polymere wegen der bereits beschriebenen strukturellen Besonderheiten nur mehr oder weniger breite Übergangsbereiche angebar.

#### Amorphe Phase



Mit steigender Temperatur werden im Glaszustand (Festzustand) zunehmend mikrobrownssche Platzwechsel durch Abnahme der ZMK angeregt, deren „individuelle“ molekulare Wirksamkeit durch die Temperaturlage ( $T_n$ ) sogenannter Nebeneinfriergebiete (Nebenrelaxationsgebiete) angezeigt werden.

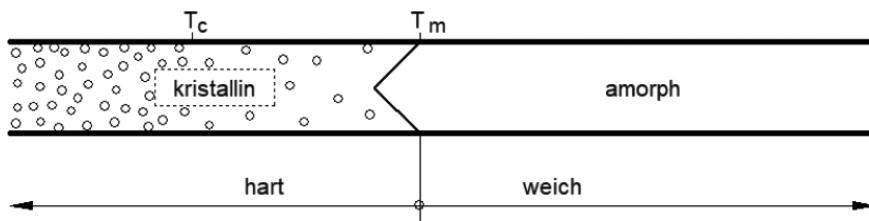
Jenseits der Haupteinfriertemperatur oder Glastemperatur ( $T_g$ ) ist die mikrobrownssche Molekülbewegung durch das Aufheben aller molekularen Nahordnung freigesetzt, d. h. die ZMK haben ihre unmittelbare Wirksamkeit für die Molekülfixierung verloren.

Oberhalb des Verglasungsbereichs liegt der thermoelastische (gummiartige) Zustand, dessen besondere Struktur-/Eigenschaftszusammenhänge noch später ausführlicher besprochen werden.

Nebeneinfriertemperaturen und Glastemperatur sind durch strukturelle Merkmale physikalisch definiert und damit nach einheitlichen Kriterien messbar. Je nach Prüfverfahren und aktueller Polymerstruktur können die Messwerte der Glastemperatur bis zu 40 K schwanken.

Der thermoplastische Zustand ist in seinem Übergang als kontinuierliche Zunahme der Fließfähigkeit mit steigender Temperatur anzusehen, dessen Abgrenzung zum thermoelastischen Zustand durch Fließtemperaturen, No-Flowtemperaturen u.a. ( $T_f$ ) mit vereinbarten Viskositätsprüfverfahren ohne physikalische Relevanz möglich ist. In Thermoplastschmelzen sind selbst bei höherer Temperatur noch thermoelastische Anteile vorhanden.

### Kristalline Phase



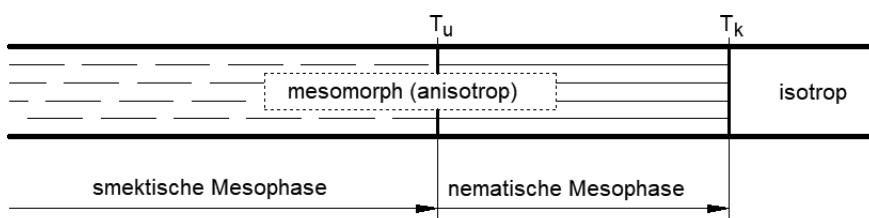
Bei kristallinen Phasen werden nur die Zustände kristallin und amorph durch die Schmelzendtemperatur ( $T_m$ ) abgegrenzt, die aus Sicht mechanischer Belastung unterschiedliche Härte bzw. Weichheit bedeuten.

Mit steigender Temperatur können je nach konfigurativen Voraussetzungen im kristallinen Zustand Kristallgitterumwandlungen ( $T_c$ ) stattfinden, die Nachschwingungseffekte und Vorschmelzen weniger gut geordneter Kristallite bewirken können.

Bei stark eingeschränkter Kristallisation können trotz steigender Temperatur Rekristallisationsvorgänge temporäre Kristallisationsgraderhöhungen mit exothermer Wärmetönung verursachen. Das Aufschmelzen kristalliner Strukturen ist ein endothermer Vorgang, dessen erforderliche Schmelzwärme vom Kristallisationsgrad und der Art der Kristallstruktur abhängt. Oberhalb der Schmelzendtemperatur sind alle Kristallite geschmolzen.

Der Schmelztemperaturbereich ist meist mit üblichen Prüfverfahren relativ eng begrenzt messbar. Beim Erstarren von Schmelzen ist deren Unterkühlbarkeit zu beachten. Für einige Polymere liegt die Erstarrungstemperatur ( $T_e$ ) bis 40 K unter der Schmelzendtemperatur.

### Mesomorphe Phase



In der mesomorphen Phase ist bei der Umwandlungstemperatur ( $T_u$ ) die Änderung verschiedener Mesophasenstrukturen möglich, die sich durch Ausrichtung und Packungssymmetrie unterscheiden. Davon wird die Anisotropie der Mesogene nicht berührt. Deren Existenzbereich schließt mit der Klärtemperatur ( $T_k$ ) ab.

Ob Mesomorphie im glasartigen, thermoelastischen oder thermoplastischen Zustand vorkommt, hängt von der Gesamtstruktur der Polymeren ab. Thermotrope

LCP sind als technische Kunststoffe interessant, wenn sie im thermoplastischen Zustand mesomorph sind. Mesphasenumwandlungen und Aufhebung des mesomorphen Zustandes sind mit keinen nennenswerten Wärmetönungen verbunden.

Polymere können je nach Phasenstruktur alle vorstehend genannten Zustands- und Übergangsbereiche durchlaufen, wenn sie sich vorher nicht thermisch zersetzen. Der thermische Zersetzungsbereich als Folge chemischer Abbauprozesse beendet die Existenz der Polymere. Ein gasförmiger Zustand ist nicht möglich.

### **Gummielastizität im thermoelastischen Zustand**

Referenzstoff für Gummielastizität ist der vernetzte (vulkanisierte) Kautschuk (= Gummi).

Voraussetzung sind lineare Makromoleküle im thermoelastischen Zustand mit maximaler mikrobrownsschen Molekülbeweglichkeit sowie weitmaschiger punktueller Vernetzung der Molekülketten.

Nach Deformation des „Netzwerkes“ wird durch Entropievergrößerung (Molekülknäuelung) sofort eine Rückstellung der Verformung eintreten. Es gilt daher die Gleichsetzung „Gummielastizität = Entropieelastizität“, die nur charakteristisch für weitmaschig vernetzte makromolekulare Stoffe großer Molekülbeweglichkeit ist.

## **1.3.4 Vernetzungsstrukturen der Polymere**

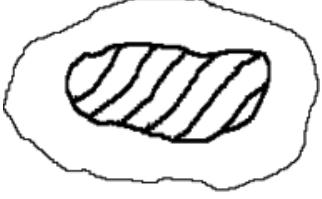
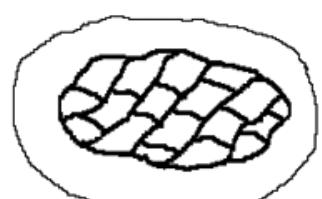
### **1.3.4.1 Chemische Vernetzungsstruktur**

Weitmaschige chemische Vernetzung (Vulkanisation) im thermoelastischen Zustand mittels Vernetzungsmittel (z.B. Schwefel, Peroxide) ergibt den Werkstoff Gummi. Durch chemische Reaktionen engmaschig vernetzte (gehärtete) Kunstharze sind Duroplaste. Die Vernetzungsstellen sind thermisch ohne Zersetzung nicht rückbildungsfähig.

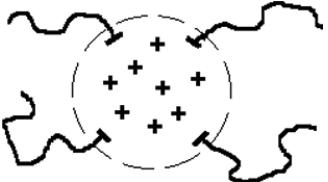
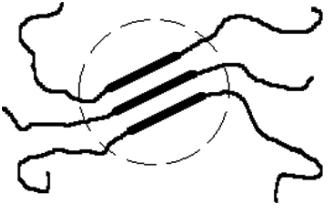
### **1.3.4.2 Physikalische Vernetzungsstruktur**

Physikalische Vernetzungsstellen werden bei Temperaturerhöhung aufgehoben und bei Abkühlung zurückgebildet, wodurch thermoplastische Verarbeitung ermöglicht wird. Ihre Zusammenhaltkräfte sind deutlich geringer als bei chemischer Vernetzung. Dies ist im Zusammenhang mit mechanischer Beanspruchung von großer Bedeutung (plastisches Fließen).

In den tabellarischen Zusammenstellungen beziehen sich alle Vernetzungsstrukturen auf den thermoelastischen Zustand thermoplastisch verarbeitbarer Polymere. Molekülverschlaufungen sind die einzige Vernetzungsstruktur, die auch im thermoplastischen Zustand Gummielastizität bewirkt.

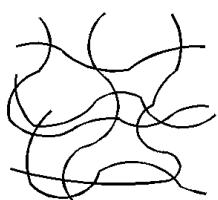
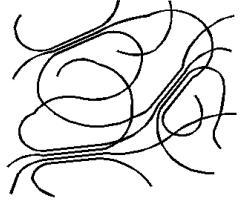
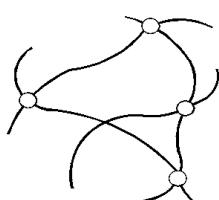
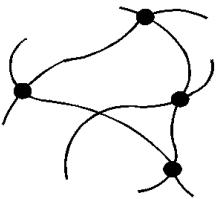
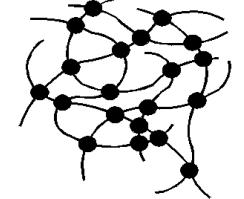
Physikalische Vernetzungsstruktur bei elastomerähnlichen Thermoplasten	
	Amorphe Thermoplaste ( $T_g < T_r$ ), deren Molekülverschlaufungen (engl.: entanglements), insbesondere bei sehr hochmolekularen Typen, als temporäre und fluktuierende Vernetzungsstellen wirken. z. B. PIB, PE-C, PVC-P
	Teilkristalline Thermoplaste ( $T_g < T_r$ ) mit sehr geringem Kristallisationsgrad, deren kristalline Bereiche als Vernetzungsstellen wirken. z. B. PE-VLD
 	Blends aus Thermoplasten als kohärente Phase (Matrix) mit unvernetzten oder vernetzten Elastomeren als feindisperse Phase, wobei die Matrix als „Netzwerkgerüst“ wirkt. Verbesserung der Phasenkopplung durch Kompatibilisatoren (z. B. Ppropfcopolymere) ist üblich. <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <b>unvernetzte Phase:</b> z. B. (EPDM+PP), (NR+PP)</li> <li>▪ <b>vernetzte Phase:</b> z. B. (EPDM-X+PP), (NR-X+PP)</li> </ul>

 $T_g$  Glastemperatur $T_r$  Raumtemperatur (z. B. 23 °C)

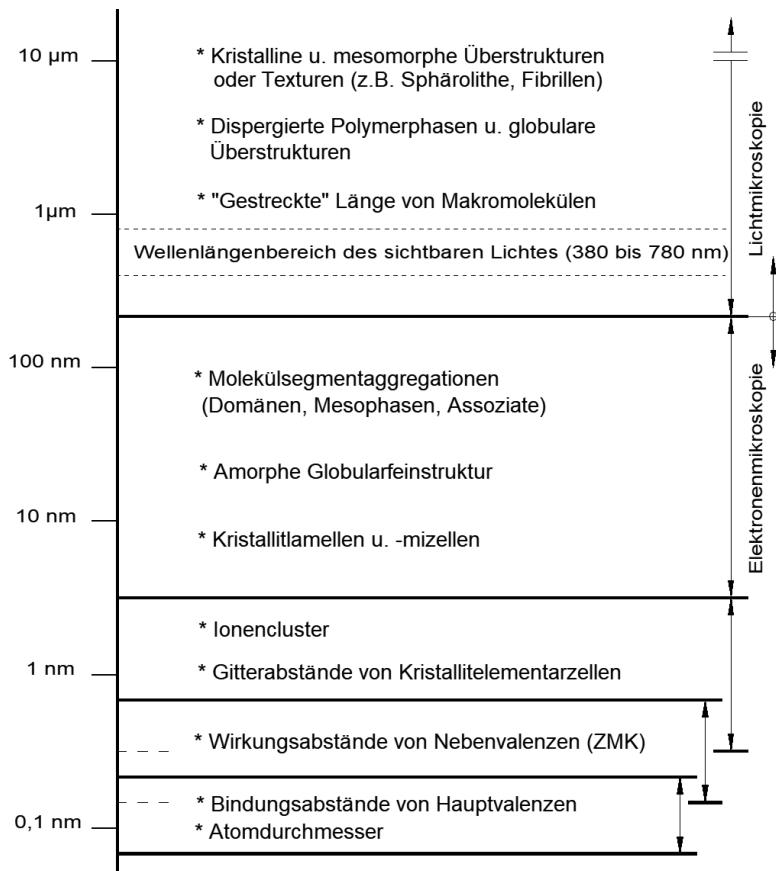
Physikalische Vernetzungsstrukturen bei thermoplastischen Elastomeren	
	Thermoplaste ( $T_g < T_r$ ) mit partiellen Ionenbindungen, die als aggregierte Ionencluster wie Vernetzungsstellen wirken (Ionomere)
	Amorphe Teleblockcopolymere (Triblockpolymere) mit langkettigem Weichsegmentmittelblock ( $T_g < T_r$ ) und endständigen Hartsegmentblöcken ( $T_g > T_r$ ), die sich wegen Unverträglichkeit zur Domänenstruktur entmischen und in der die aggregierten Hartdomänen als Vernetzungsstellen wirken. Blends mit Thermoplasten sind auch üblich. z. B. TPS (SBS, SEBS)
	Segmentcopolymere aus langkettigen Weichsegmentblöcken ( $T_g < T_r$ ) sowie aus Hartsegmentblöcken mit Kristallisationsneigung, die sich zur Domänenstruktur entmischen und in der aggregierte teilkristalline Hartdomänen als Vernetzungsstellen wirken. z. B. TPC, TPA, TPU

 $T_g$  Glastemperatur $T_r$  Raumtemperatur (z. B. 23 °C)

### 1.3.4.3 Basisstrukturen der Polymere (unvernetzt und vernetzt)

 amorphe Thermoplaste unvernetzt	 teilkristalline Thermoplaste unvernetzt	 thermoplast. Elastomere weitmaschig vernetzt
 Gummi (vulkan. Kautschuk) weitmaschig vernetzt	 Duroplaste engmaschig vernetzt	<ul style="list-style-type: none"> <li>● <b>chemische Vernetzungsstellen</b> aus Atombindungen</li> <li>○ <b>physikalische Vernetzungsstellen</b> aus Hardomänen unverträglicher (entmischter) Molekülteile von Copolymeren, aus Kristallitclustern oder Ionenclustern</li> </ul>

### 1.3.5 Abmessungsbereiche molekularer und morphologischer Strukturelemente



Die angegebenen Bereiche sind nur als ungefähre Größenmaßrelationen aufzufassen, da im Einzelfall größere Überschneidungen möglich sind. Eine einfache Nutzanwendung dieser Darstellung besteht darin, dass Strukturelemente mit Abmessungen unterhalb der Wellenlänge des sichtbaren Lichtes die visuell wahrnehmbare Lichtdurchlässigkeit des Kunststoffes nicht beeinflussen.



Beliebige strukturelle Veränderungen in diesem Größenbereich ergeben daher immer transparente Polymere. Veränderungen oberhalb dieses Bereichs erzeugen bei Teilkristallinität transluzente bzw. opake Polymere.

### 1.3.6 Löslichkeit und Quellbarkeit der Polymere

Bei Einwirkung niedermolekularer Medien als Flüssigkeiten oder Gasen auf Polymere sind folgende Erscheinungen zeit- und temperaturabhängig festzustellen:

- Irreversibler chemischer Angriff auf die molekulare Struktur (Alterung).
- Reversible physikalische Einwirkung durch Lösen (Solvatation) bzw. Quellen.

Beide Phänomene können die Anwendung bestimmen bzw. verhindern (Medienbeständigkeit, Weichmachung, Klebbarkeit, Lösungsverarbeitung, Spannungsrißbildung u.a.). Nachstehend wird nur der Löse- und Quelleffekt behandelt.



Entscheidend für die intermolekulare Wechselwirkung zwischen Medium und Polymer sind ZMK, Molekülgestalt und Molekülgröße, Ordnungsgefüge (amorph, kristallin) sowie Assoziationsphänomene in komplexem Zusammenspiel.

Lösung setzt vollständige Trennung der Makromoleküle voraus (max. makro-brownsche Molekülbewegung), wobei diese mit Solvathüllen aus Lösungsmittel umgeben sind. Das Quellen ist als begrenzter Lösevorgang aufzufassen, bei dem Quelldruck und Zusammenhaltkräfte des Polymeren im Gleichgewicht stehen. Ergebnis ist ein mehr oder weniger aufgequollenes Gel (Plastigel).

Völlige Unverträglichkeit zwischen Medium und Polymer ist für Forderungen nach Medienbeständigkeit wünschenswert. Es hat nicht an vielfältigen Versuchen gefehlt, zutreffende Voraussagen zur Löslichkeit oder Medienbeständigkeit mittels Kennwerten und Parameter zu machen. Für gute Löslichkeit gilt der Erfahrungssatz: Ähnliches löst sich in Ähnlichem. Eine groborientierende Quantifizierung ist mit dem Löslichkeitsparameter  $\delta$  möglich, wenn seine Geltungsgrenzen beachtet werden:

$$\delta = \sqrt{\frac{\Delta H_V - R \cdot T}{V_m}}$$

$\Delta H_V$ : Molare Verdampfungswärme

$V_m$ : Molvolumen

$R$ : Allgemeine Gaskonstante

$T$ : Bezugstemperatur

Für niedermolekulare Medien ist der Löslichkeitsparameter nach Hildebrand direkt bestimmbar. Bei Polymeren ist eine indirekte Bestimmung nach verschiedenen Methoden möglich. Zahlenwerte des Löslichkeitsparameters können aus Daten bzw. der Fachliteratur entnommen werden.

Weitgehend gleiche Parameter deuten auf Verträglichkeit zwischen Medium und Polymer hin, soweit die Molekülgestalt, Molekülassoziationen und Molekülgröße nicht gegenläufige Wirkungen hervorrufen. Gleiches gilt im umgekehrten Falle.

Für die Beurteilung der Polarität der Medien ist das Dipolmoment  $\mu$  geeignet. Für völlig unpolare Medien gilt  $\mu = 0$ . Für polares Wasser ist  $\mu = 1,84 \text{ D}$ .

Bei chemisch ähnlich strukturierten Mediengruppen (z.B. FCKW) sind die Voraussetzungen für die Anwendung des Löslichkeitsparameters besonders günstig.

Der Autor konnte damit erfolgreich die Kältemittelbeständigkeit von Polymeren beschreiben und Auswahlrichtlinien formulieren (Luft- und Kältetechnik 1966/1, S. 24 bis 28. Herausgeber: ILK Dresden.).



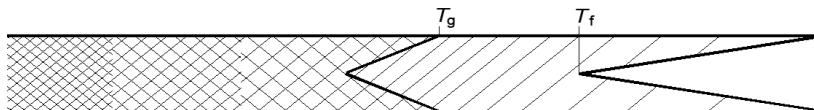
Eine weitere Anwendung für Treibmittel auf FCKW-Basis wurde vom Autor zu einem patentierten Verfahren für das Verschäumen eines neu entwickelten Aceton-Formaldehyd-Schaumstoffes geführt (DKK Scharfenstein, 1966).

## ■ 1.4 Dilatometrisches und mechanisches Eigenschaftsbild der Kunststoffe

### 1.4.1 Thermische Zustände und Übergangsbereiche von Polymeren (außer LCP)

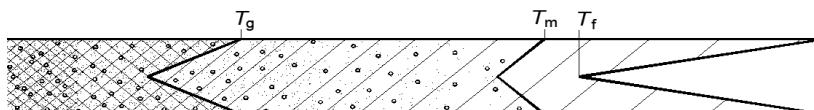
Aus der Überlagerung der thermischen Zustände der Polymerphasen ergeben sich die Zustände und Übergangsbereiche der realen Polymere. Deren konkrete Temperaturlage ist für die Anwendung und Verarbeitung von entscheidender Bedeutung, insbesondere bezüglich mechanischer, dilatometrischer und rheologischer Eigenchaften.

### Amorphe Thermoplaste und thermoplastische Elastomere



Ein gasförmiger Zustand ist nicht möglich, da vorher Zersetzung erfolgt.

### Teilkristalline Thermoplaste und thermoplastische Elastomere



glasartig   thermoelastisch (gummiartig)   thermoplastisch   teilkristallin

$T_g$ : Glastemperatur

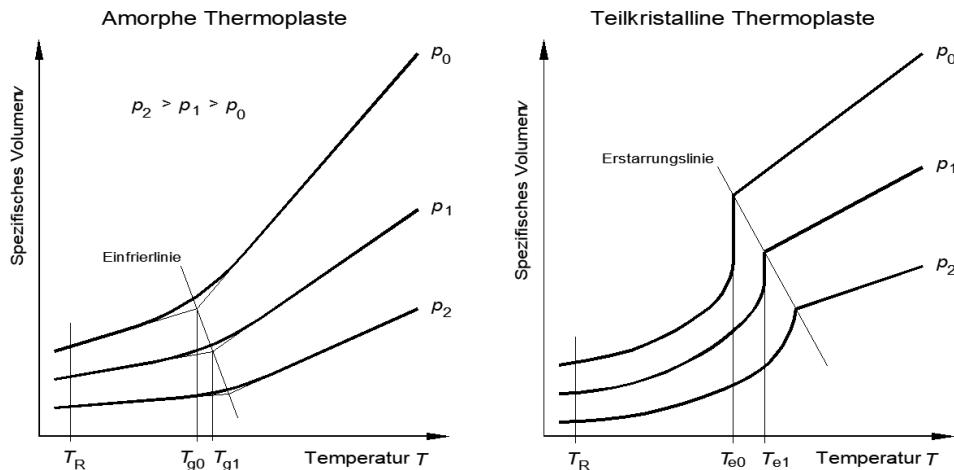
$T_m$ : Schmelzendtemperatur

$T_f$ : Fließtemperatur

Duroplaste sind immer amorph und haben je nach Vernetzungsgrad eine hohe Glastemperatur mit sehr wenig ausgeprägtem thermoelastischen Bereich. Thermoelastizität fehlt völlig.

## 1.4.2 p-v-T-Verhalten von Thermoplasten

Die Komprimierbarkeit des Volumens ( $v$ ) der Thermoplaste in Abhängigkeit von Druck ( $p$ ) und Temperatur ( $T$ ) ist u. a. eine wichtige Eigenschaft zur Steuerung der Maßhaltigkeit (z.B. Verarbeitungsschwindung bei Verarbeitungsprozessen, wie Spritzgießen). Nachfolgend die Darstellung bei Abkühlung und Erstarrung von Thermoplastschmelzen unter hydrostatischem Druck.



### 1.4.3 Bereiche mechanischer und dilatometrischer Eigenschaften der Polymere (außer LCP)

Für Polymere ohne Füll- und Verstärkungsstoffe wird eine Zuordnung in Bereiche charakteristischer mechanischer und dilatometrischer Eigenschaften vorgenommen. Es handelt sich dabei um den Kurzzeit-E-Modul nach DIN EN ISO 527, der Shorehärte (A; D) nach DIN ISO 7619 und dem linearen Wärmeausdehnungskoeffizienten  $\alpha$  nach ISO 11359-2.

Mechanische und dilatometrische Eigenschaften ungefüllter und unverstärkter Polymere				
Härtegrad	$E$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Shorehärte A; D	$\alpha$ [ $10^{-5} \times K^{-1}$ ]	Polymere
<b>hart</b>	> 1200 ... 5000	> 75D	12 ... 7	Zähharte bis sprödharte Thermoplaste, Duroplaste, Hartgummi
<b>halbhart</b>	> 300 ... 1200	>60D ... 75D	17 ... 12	Weichelastische Thermoplaste, thermoplastische Elastomere und Gummi unterschiedlicher Härte
	> 30 ... 300	>35D ... 60D	26 ... 17	
<b>weich</b>	3 ... 30	50 A ... 90 A	35 ... 26	
<b>sehr weich</b>	< 3	<50 A	> 35	

Für „harte“ Polymere ist die Glastemperatur  $T_g > 30$  °C. Teilkristalline Thermoplaste mit  $T_g < 15$  °C (z.B. PP, POM), aber nach möglicher Realisierung eines sehr hohen Kristallisationsgrades, sind „hart“. Ansonsten gilt für alle weicheren Polymere  $T_g < 15$  °C.

Aus der Zusammenstellung ist für die Werkstoffauswahl ableitbar, dass geringere Steifigkeit bzw. Härte immer mit größerer Wärmeausdehnung verbunden sind. Diese Gesetzmäßigkeit gilt auch bei Zusätzen von Füll- und Verstärkungsstoffen.

#### **1.4.4 Orientierung molekularer und morphologischer Strukturen durch Reck- und Fließprozesse**

##### **Orientierung im Festzustand:**

Werden amorphe Thermoplaste im Festzustand durch hinreichend große Zugkräfte gereckt, so entsteht durch lokale Temperaturerhöhung an der Verstreckungsstelle (Einschnürung) plastisches (makrobrownisches) Fließen mit Parallelalagerung der Makromoleküle (= Molekülorientierung), die eine Eigenschaftsanisotropie zur Folge hat. Beim Recken teilkristalliner Thermoplaste können infolge Umlagerung bzw. Neubildung orientierte kristalline Strukturen (z.B. Fibellen, Shish-Kebab-Strukturen) mit noch größerem Anisotropieeffekt im Vergleich zu amorphen Linearpolymeren entstehen. In Verstreckungsrichtung werden Steifigkeit und Festigkeit u.U. erheblich erhöht, so dass dieses Verfahrensprinzip bei der Verarbeitung genutzt wird (z.B. Fadenrecken, biaxiale Folienverstreckung, Walzpressrecken). Bei entsprechender Temperaturerhöhung können diese Orientierungen durch Schrumpfung zurückgebildet werden (Entropieelastizität), da es sich um energetisch „eingefrorene“ Zwangszustände handelt.

Infolge der engmaschigen Molekülvernetzung sind Reckprozesse bei Duroplasten mit plastischer Verformung nicht möglich. Bei chemisch vernetztem Gummi ist begrenzte Verformung ohne plastische Deformation möglich, wobei die Parallelalagerung der Moleküle eine Teilkristallisation (Dehnungskristallisation) erzeugen kann. Hingegen ist bei thermoplastischen Elastomeren wegen der energieärmeren physikalischen Vernetzungsstellen ein plastisches Fließen möglich.

##### **Orientierung im thermoplastischen Zustand:**

Fließvorgänge durch Scherströmungen erzeugen in der Thermoplastschmelze Molekülorientierungen in Fließrichtung, die wegen ihres geringeren Fließwiderstandes (Modell: Baumstämme im Fluss) eine Viskositätsabnahme bewirken. Dieser Effekt wird als Strukturviskosität bezeichnet und reduziert z.B. die erforderlichen Verarbeitungsdrucke beim Spritzgießen erheblich.

Wird die durch Strömung verursachte Molekülorientierung durch Abkühlung „eingefroren“, ist im Polymer ein entropiebedingter Spannungszustand fixiert, der bei entsprechender Temperaturerhöhung durch Schrumpfung abgebaut wird.

### 1.4.5 Zeitabhängiges Deformationsverhalten der Polymere

Werden Polymere einer mechanischen Belastung ausgesetzt, so ist eine zeitabhängige Verformungszunahme bei vorgegebener Spannung (Kriechen, Retardation) bzw. ein zeitabhängiger Spannungsabbau nach erfolgter Verformung (Entspannung, Relaxation) zu beobachten. Dieses Verhalten, auch als Viskoelastizität bezeichnet, lässt sich auf die gleichzeitige Wirkung von drei unterschiedlichen Deformationsmechanismen zurückführen:

Verformungsart	Molekulare Ursache	Zeitabhängigkeit der Verformung		Bedingungen für ideale Wirksamkeit		
		Belastung	Entlastung	Thermischer Zustand	Mikro-brown-sche Beweglichkeit	Makro-brown-sche Beweglichkeit
<b>energie-elastisch</b> (auch: spontan-elastisch, stahl-elastisch)	Konfigurationsänderung ohne molekulare Platzwechsel	Spontane Verformung	spontane Rückverformung (reversibel)	glasartig	minimal	minimal
<b>entropie-elastisch</b> (auch: gummi-elastisch)	Mikro-brown-sche Konformationsänderung	Zeitverzögerte Verformung	zeitverzögerte Rückverformung (reversibel)	thermo-elastisch	maximal	minimal
<b>plastisch</b> (auch: viskos)	Makro-brown-sche Konformationsänderung	Zeitverzögerte Verformung	bleibende Verformung (irreversibel)	thermo-plastisch	maximal	maximal

Das nichtnewtonsche Fließen (Strukturviskosität) von Polymerschmelzen und -lösungen ist gleichfalls dieser Deformationsmechanik geschuldet. Es ist anschaulich, makromolekulare Stoffe bezüglich ihres Verformungsverhaltens als Hybride aus Festkörpern, Flüssigkeiten und Gasen anzusehen. Die bereits mehrfach betonte Eigenschaftsvielfalt der Polymere wird dadurch verständlicher.

## ■ 1.5 Stoffliche Modifizierung der Polymere

### 1.5.1 Funktionsadditive und chemische Modifizierung

#### Eigenschaftsvergleich Kunststoffe – Stahl

Die Spannweite des Eigenschaftsbildes der Kunststoffe soll in Gegenüberstellung mit dem Werkstoff Stahl verdeutlicht werden, um Anwendungsbreite und Anwendungsschwerpunkte dieser Werkstoffgruppe und Motivationen für ihre stoffliche Modifizierung aufzuzeigen. Es handelt sich bei dem Vergleich um übliche Polymere, deren chemische und morphologische Struktur bereits beschrieben wurde. Chemisch modifizierte Spezialpolymere (z.B. elektrisch leitfähige Polymere) werden bei dem Vergleich nicht berücksichtigt. Es werden nur Eigenschaftsdaten angegeben, die bezüglich Prüfbedingungen und Aussagekraft vergleichbar sind. Nicht berücksichtigt ist die sehr begrenzte Wärmebeständigkeit der organischen Polymere im Vergleich zu Stahl.

Eigenschaft	Kompaktkunststoffe ohne Zusatzstoffe	Unlegierter Stahl
Dichte g/cm <sup>3</sup>	0,8 ... 2,2	7,85
Wärmeleitzahl W/m K	0,15 ... 0,5	50
Elektrische Leitfähigkeit S/m	$10^{-11} \dots 10^{-16}$	$10^7$
E-Modul N/mm <sup>2</sup>	3 ... 5000 LCP: 5000 ... 20 000	210 000
Wärmedehnzahl $10^{-5} \times K^{-1}$	7 ... 35 (ohne LCP)	1,2
Brennbarkeit	<b>Von</b> leicht entflammbar mit großer Abbrandgeschwindigkeit <b>Bis</b> nicht oder schwer zündbar bzw. sofort selbstverlöschend	Nicht brennbar

Bei der Vielzahl von Methoden und Techniken zur stofflichen Modifizierung von Polymeren soll zunächst nur ein Überblick durch Aufzählung der möglichen Zusatzstoffe gegeben werden. Anschließend werden einige Modifizierungsvarianten von allgemeiner Bedeutung näher behandelt, wobei auch dabei nur eine inhaltliche Übersicht möglich ist. Bei den nachfolgenden Zusammenstellungen ist zu berücksichtigen, dass in der Nomenklatur der Zusatzstoffe begriffliche Überschneidungen möglich sind.

## Funktionsadditive

Regulierung der chemischen Stoffumwandlung	Erzeugung spezieller morphologischer, zellularer oder kapillarer Strukturen
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Monomere, Vernetzungsmittel</li> <li>▪ Härter bzw. Aktivatoren (Katalysatoren)</li> <li>▪ Beschleuniger</li> <li>▪ Verzögerer (Inhibitoren)</li> <li>▪ Strukturregler</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Keimbildner (Nukleierungsmittel)</li> <li>▪ Treibmittel, Kicker</li> <li>▪ Porenregler</li> <li>▪ Kapillarbildner</li> <li>▪ Feuchtigkeitsabsorber</li> <li>▪ Haftvermittler (Compatibilizer)</li> </ul>
Erzielung gewünschter Verarbeitungs- und Anwendungseigenschaften	
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Weichmacher, Flexibilisatoren</li> <li>▪ Verdünner, Extender, Thixotropiermittel, Antisedimentationsmittel</li> <li>▪ Flammenschutzmittel, Rauchminderer</li> <li>▪ Farbmittel (Farbstoffe, Farbpigmente), Aufheller, Mattierungsmittel</li> <li>▪ Lichtschutzmittel (UV-Absorber, Quencher, Radikalfänger)</li> <li>▪ Wärme- und Hydrolysestabilisatoren, Antioxidantien, Alterungsschutzmittel, Metalldesaktivatoren</li> <li>▪ Antiradantien</li> <li>▪ Gleit-, Trenn-, Antiblock- und Anticakingmittel</li> <li>▪ Antistatika, Leitfähigkeitzusätze (Wärme, Elektrizität), Dotierungsmittel, Magnetisierzusätze</li> <li>▪ Geruchsverbesserer, Fungizide, Biostabilisatoren</li> </ul>	

## Chemische Modifizierung der Polymerstruktur

**Intrinsinisch leitfähige Polymere** haben eine mit den Metallen vergleichbare elektrische Leitfähigkeit. Diese Leitfähigkeit wird durch konjugierte Doppelbindungen in Verbindung mit Dotierung von Fremdatomen erzielt. Auf diesem Wege sind auch Halbleiterpolymere darstellbar.

Beispiele für elektrisch leitfähige Polymere sind Polyacetylen, Poly-para-phenylen, Polyanilin.

**Polyelektrolyte** sind wasserlösliche Polymere, die anionische (Polysäuren) oder kationische (Polybasen) dissoziierbare Gruppen tragen. Auch das DNA-Molekül ist ein starker Polyelektrolyt. Weitere Beispiele sind Polystyrolsulfonat, Polyacrylsäure und Polyethylenimin. Anwendung finden Polyelektrolyte u.a. als Beschichtungsmittel für unterschiedliche elektrische und chemische Effekte sowie als Eindickungsmittel.

## 1.5.2 Füll- und Verstärkungsstoffe

Füll- und Verstärkungsstoffe sind Feststoffe mit unterschiedlichen Formen und Abmessungen, die nach Einarbeitung in die Polymermatrix durch deutliche Phasenabgrenzungen erhalten bleiben, also im Polymer unlöslich sind. Geringer Stoffaustausch durch Imprägnieren bzw. Tränken mit der Polymersubstanz ist u.U. möglich. Füll- und Verstärkungsstoffe sollen dem Mischwerkstoff bestimmte Eigenschaften verleihen, die im Regelfall nur durch höhere Zugaben (meist über 10%) erreicht werden. Ziel von Füllstoffanwendungen kann auch die Senkung der Materialkosten sein, wobei die Füllstoffe dann die Funktion von Streckmitteln erfüllen. Eine eindeutig definierte Abgrenzung der Füll- und Verstärkungsstoffe von den Funktionsadditiven ist nicht immer möglich. Desgleichen lassen sich Füll- und Verstärkungsstoffe nicht klar voneinander unterscheiden. Wenn die Zugabe zum Polymer eine merklich zugfestigkeitserhöhende Wirkung hat, wird allgemein von Verstärkungsstoffen gesprochen. Insbesondere faserförmige Zusatzstoffe und alle textilen Gebilde werden zu den Verstärkungsstoffen gezählt. Auch Mischungen verschiedener Füll- und Verstärkungsstoffe finden als Hybridfüllstoffe Anwendung (z.B. Glasfaser + Minerale).

Aus Sicht der stofflichen Basis lassen sich die meisten Füll- und Verstärkungsstoffe wie folgt zuordnen:

Anorganische Stoffe	Organische Stoffe
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Gläser, Keramik, anorg. Oxide</li> <li>▪ Natürliche und synthetische Minerale</li> <li>▪ Metalle und Metalloxide</li> <li>▪ Kohlenstoffmodifikationen (Carbonfasern, Ruß, Grafit, C-Nanoröhren)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Natürliche oder stofflich abgewandelte Stoffe mit großen Cellulose- u./o. Ligninanteilen (z.B. Hölzer, Baumwolle, Sisal, Jute, Papiere), Stärkeprodukte.</li> <li>▪ Chemiefaserprodukte, sonstige Polymere (PTFE)</li> </ul>

### 1.5.2.1 Gefüllte und verstärkte Polymere

Um gewünschte Anwendungseigenschaften der Polymere zu erzielen, wurden von Anbeginn der Entwicklung der Polymerwerkstoffe Füll- und Verstärkungsstoffe eingesetzt. Nachstehend können nur ausgewählte Aspekte dieser stofflichen Modifizierung behandelt werden. Verstärkungswirkung wird dabei im Sinne von Zugfestigkeitserhöhung betrachtet.

### Einfluss der Partikelgestalt und des aspect ratio auf Anisotropie und Verstärkungswirkung

Partikelgestalt	aspect ratio (a. r.) (Größenordnung)	Anisotropieausprägung Verstärkungswirkung
körnig	1 ... 10 (Kugel: a.r. = 1)	keine bzw. gering
flächig	> 10	deutlich
faserförmig	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Kurzfaser: &gt; 10</li> <li>▪ Langfaser: &gt; 1000</li> <li>▪ Endlosfaser: <math>\infty</math></li> </ul>	groß bis extrem

a. r.: Längen/Durchmesser (Dicken) – Verhältnis

### Einfluss der Füll- und Verstärkungsstoffe auf Werkstoffsteifigkeit und Wärmedehnung

- **Anorganische Füll- und Verstärkungsstoffe** erhöhen die Werkstoffsteifigkeit (z.B. E-Modul) wesentlich, während die Wärmedehnung (Wärmedehnzahl, Verarbeitungsschwindung u.a.) entsprechend verringert wird.
- **Organische Füll- und Verstärkungsstoffe** haben auf Werkstoffsteifigkeit und Wärmedehnung nur unwesentlichen Einfluss.

### Dichten und Wärmeleitzahlen für anorganische Füll- und Verstärkungsstoffe

Für ausgewählte Stoffbeispiele (außer Metalle) soll die Spannweite dieser anwendungstechnisch interessanten Eigenschaften aufgezeigt werden.

Stoffbeispiele	Dichte [g/cm <sup>3</sup> ]	Wärmeleitzahl [W/mK]
Kohlenstoffmodifikationen (Ruß, Grafit, Carbonfaser) abhängig von Kristallstruktur und Anisotropie	1,8 ... 2,3	7 ... 165 C-Nanoröhren: 6000
Glas	2,5	1
Leichtminerale (Kreide, Talkum, Wollastonit, Kaolin, Glimmer, Magnesit)	2,6 ... 3	ca. 3
Schwerminerale (Zirkonsilikat, Schwerspat, Lithopone, Zinkspat)	4 ... 4,6	ca. 4

### Verschleißverhalten (Abrasionsverschleiß) fester Zusatzstoffe

Das Verschleißverhalten von Füllstoffen, Verstärkungsstoffen und ausgewählten sonstigen

Funktionsadditiven kann in grober Näherung mit der Ritzhärte nach Mohs bewertet werden, wobei größere Härte größeren Verschleiß bedeutet. Dies gilt sowohl für Feststoffreibung als auch für Reibung als Bestandteil einer Schmelze (z.B. auf

Stahl). Neben der Stoffhärte haben noch der Volumenanteil in der Schmelze und die Stoffpartikelform einen mehr oder weniger großen Einfluss.

Ritzhärte nach Mohs	Stoffbeispiele
1 ... 2	Talkum, Kaolin, Gips, Blei, Kohlenstoffmodifikationen (Grafit, Ruß, Carbonfaser, C-Nanoröhren), Organische Zusatzstoffe (z. B. PTFE, Aramid, PE-UHMW, Cellulose, Holzmehl, Lignin), Molybdändisulfid
über 2 ... 4	Kreide, Serpentinasbest (Chrysotil), Glimmer, Schwerspat ( $\text{BaSO}_4$ ), Lithopone, Magnesiumoxid, Aluminium, Kupfer, Bleibronze, Aluminiumhydroxid ( $\text{Al}(\text{OH})_3$ )
über 4 ... 6	Blauasbest (Krokydolith), Zinkoxid, Zinkspat ( $\text{ZnCO}_3$ ), Titandioxid (Anatas, Rutil), Magnesit ( $\text{MgCO}_3$ ), Wollastonit, Bariumferrit, Eisen, Magnetit ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), Hochdisperse Kieselsäure (Aerosil)
über 6	Glas, Quarzgut, Quarz und quarzhaltige Gesteinsmehle, Zirkonsilikat <b>Hinweis:</b> Glas in Kugel- und Faserform kann aus Sicht des Verschleißes der vorstehenden Gruppe zugeordnet werden

### Steifigkeitserhöhung durch Füll- und Verstärkungsstoffe

Die Steifigkeitserhöhung durch Füll- und Verstärkungsstoffe gehört zu den wichtigsten Anwendungsaspekten dieser Stoffgruppe. Nachstehend werden dafür E-Module ausgewählter Füll- und Verstärkungsstoffe für Vergleichszwecke angegeben. Verstärkungswirkung als Zugfestigkeitserhöhung ist in nennenswertem Ausmaß nur bei Faserstoffen zu erwarten. In allen anderen Fällen handelt es sich um eine Härteerhöhung mit geringer zulässiger Verformbarkeit.

Stoffbeispiele (ohne Metalle)	E-Modul [ $\text{N/mm}^2$ ]
Carbonfaser (HT)	230 000
E-Glasfaser	73 000
Aramidfaser verstreckt (NH)	60 000
Leichtminerale (Dichte unter 3 $\text{g/cm}^3$ )	ca. 90 000
Schwerminerale (Dichte über 4 $\text{g/cm}^3$ )	ca. 130 000
Cellulose- und Naturfaser	ca. 20 000
Holzmehl	ca. 10 000

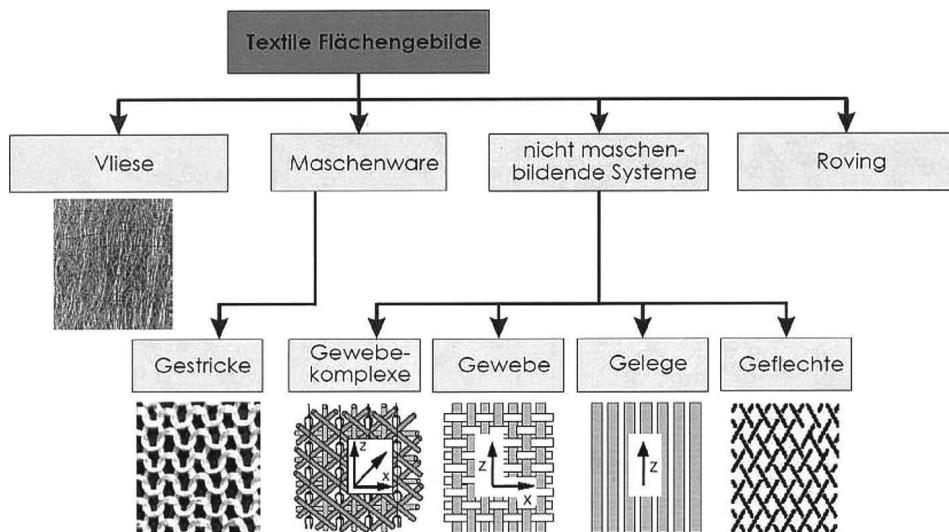
### Optimaler Füllungsgrad der Polymere

Durch Variation des Füllstoff- und Verstärkungsstoffanteils können die Eigenschaften im Sinne der aktuellen Anforderungen beeinflusst werden. Dabei können die Eigenschaftsfunktionen Extremwerte durchlaufen, die dann die Zusatzmenge begrenzen. Bei entsprechend hohem Füllungsgrad wird immer ein kritischer Grenzwert die Benetzbarkeit der dispersen Phase (Füll- und Verstärkungsstoff) in der Matrix (Polymer) und damit den Zusammenhalt begrenzen. Neben der Menge und

der Struktur der Komponenten werden die Adhäsionsbedingungen u.U. eine entscheidende Rolle spielen. Durch Oberflächenmodifizierung (z.B. Haftvermittler, chemische Kopplung) kann die Adhäsion ggf. deutlich verbessert werden. Extremwerte des kritischen Füllungsgrades sind wegen der komplexen Zusammenhänge nicht allgemeingültig angebbar, dürften aber oft zwischen 50 bis 70 Vol. % liegen.

### Faserverstärkung:

Faserförmige Verstärkungsstoffe lassen sich nach der Richtungsabhängigkeit der Verstärkungswirkung in quasiisotrope (Matten/Vliese), unidirektionale (Rovings/Stränge) und orthogonale (Gewebe, Gestricke, Gelege, Geflechte) Verstärkungsstoffe einteilen. Carbonfasern in Verbindung mit textilen Verstärkungsstrukturen und geeigneten Kunstharzen bilden die z. Z. höchstbelastbaren Polymerwerkstoffe (Composite), die bereits in vielen Bereichen (z.B. Flugzeug-, Automobil- und Anlagenbau) angewendet werden.



### 1.5.3 Schaumstoffe

Polymerschaumstoffe sind künstlich hergestellte Stoffe mit zelliger Struktur und niedriger Dichte. Zur Schaumstoffherstellung eignen sich nahezu alle Polymere (Thermoplaste, Duroplaste, Elaste). Einzelheiten der Schäumverfahren und Treibtechniken sind nicht Gegenstand der nachfolgenden Betrachtungen. Eine Ausnahme bildet das MuCell-Verfahren.

### Strukturelle Einteilungsmerkmale der Schaumstoffe

- nach der Härte bzw. Steifigkeit: Hart-, Halbhart- und Weichschaumstoffe
- nach der Zellstruktur: Offenzellige, gemischtzellige und geschlossenzellige Schaumstoffe
- nach der Dichteverteilung im Querschnitt:
  - Homogenschaumstoffe: Annähernd gleichmäßige Dichteverteilung im Querschnitt. Dichtebereich meist zwischen  $200 \text{ kg/m}^3$  bis  $20 \text{ kg/m}^3$  ( $= 0,2 \text{ g/cm}^3$  bis  $0,02 \text{ g/cm}^3$ ).
  - Strukturschaumstoffe (Integralschaumstoffe): Hohe Dichte am Querschnittsrand und geringe Dichte in Querschnittsmitte mit unterschiedlichen Verteilungen. Daher auch als „randzonenverstärkte Schaumstoffe“ bezeichnet. Mittlere Querschnittsdichte meist im Bereich zwischen 70% bis 20% der Kompaktdichte des Polymeren.
- nach dem Verformungsverhalten: Spröde und flexible Schaumstoffe.
- nach der Porengröße (Zellgröße): Grobporige, feinporige bis mikrozelluläre Schaumstoffe. Die Zelldurchmesser liegen im mm-Bereich bis µm-Bereich.

### Eigenschaftsbild der Schaumstoffe

Die dichtebezogene Steifigkeit und Festigkeit sind meist sehr hoch, so dass Schaumstoffe als Kernmaterial für den Leichtbau in Form der Stützkernbauteile (Sandwichbauteile) angewendet werden. Neben der Gewichtersparnis ist vor allem auch die sehr geringe Wärmeleitfähigkeit von Bedeutung.

Offenzellige Weichschaumstoffe werden wegen ihres günstigen Deformationsverhaltens als Polstermaterial verwendet. Strukturschaumstoff-Formteile können als tragfähige Leichtbauteile variabler Geometrie ohne zusätzliche Deckschichten hergestellt werden. Für Leichtschaumstoffe mit Dichten unter  $40 \text{ kg/m}^3$  (unter  $0,04 \text{ g/cm}^3$ ) ergeben sich Wärmeleitzahlen bis zum Niveau der Zellgasfüllung.

Bei trockenen luftgefüllten Schaumstoffen werden Wärmeleitzahlen bis zu  $\lambda = 0,03 \text{ W/mK}$  erreicht. Damit sind diese leichten Polymerschaumstoffe ein sehr gefragtes Wärmedämmmaterial (z.B. flammgeschützter EPS-Schaumstoff).

Ein Nachteil der üblichen Schaumstoffteile im Vergleich zu Kompaktteilen ist die geringere Maßhaltigkeit, insbesondere die geringe Fertigungsgenauigkeit.

### MuCell – Schaumstoffe

Zur Erzeugung vom MuCell-Schaumstoff wird in die Thermoplastschmelze ein Gas ( $\text{CO}_2$  oder  $\text{N}_2$ ) im überkritischen Zustand (SCF = Super Critical Fluid) injiziert (z.B. Spritzgießen, Blasformen, Extrusion). Die Plastizierschnecke erzeugt daraus eine homogene niedrigviskose Einphasenlösung, die sich nach dem Übergang in das Formgebungswerkzeug entspannt. Dabei entsteht ein mikrozellularer Integral-

schaustoff mit einer mittleren Dichte von 90 % bis max. 80 % der Kompaktdichte. Die gleichmäßige geschlossenzellige Struktur besteht aus Zellen mit 5 bis 80 µm Durchmesser.

Der im Vergleich mit üblichen Schäumverfahren bescheidene Aufschäumgrad wird z. B. beim Spritzgießen entscheidend durch verfahrens- und anwendungstechnische Vorteile ergänzt. Hier soll besonders die große Fertigungsgenauigkeit genannt werden, die das Niveau von Kompaktspritzgussteilen erreicht. Die Formteile sind verzugsarm sowie ohne Einfallstellen und Lunker.

## 1.5.4 Äußere Weichmachung und Brennbarkeitsminderung

### 1.5.4.1 Äußere Weichmachung der Polymere

Am Beginn der Kunststoffanwendung wurde der Bedarf an weichelastischen Werkstoffen zum größten Teil durch äußere Weichmachung von Thermoplasten gedeckt. Hierbei spielte das weichgemachte PVC (PVC-P) die weitaus größte Rolle. Eine herausragende Quelle zum Verständnis des Weichmachungsprinzips hinsichtlich aller relevanten Aspekte ist

Leuchs, O: Zur Weichmachung von Polyvinylchlorid. Kunststoffe 46 (1956), Heft 12, S. 547 bis 554.

Das Prinzip der äußeren Weichmachung folgt aus der Herabsetzung der Glastemperatur (Einfriertemperatur) durch Einarbeitung organischer Substanzen (Weichmacher WM) in das Polymer, wobei durch Anquellen ein Plastigel unterschiedlicher Weichheit bei Anwendungstemperatur entsteht. Typische niedermolekulare WM für PVC ( $M = 350$  bis  $450$  g/mol) sind Ester der Phthalsäure, Phosphorsäure und Dicarbonsäuren. Für optimale und stabile Plastigele gelten folgende Anforderungen an WM:

- leicht in das Polymer einzuarbeiten (gut gelierend),
- stark erweichend (Glasmtemperatur absenkend),
- geringe Verdunstungs- und Auswanderungstendenz (geringe WM-Migration).

Dafür muss die Art der WM (ZMK, Molekülgestalt und Molekülmasse) und deren Zusatzmenge (WM-Gehalt), ggf. auch als WM-Gemisch, gut abgestimmt werden.

Ein entscheidender Nachteil der äußeren Weichmachung der Polymere ist die WM-Migration, die bei Kontakt zu lästiger Klebrigkeit sowie ggf. zu toxikologischen und organoleptischen Beeinflussungen führt. Durch Einsatz höhermolekularer WM (sogenannter „Polymer-WM“) wurde die Migrationstendenz reduziert. Auf Grund derzeitiger Schutz- und Gesundheitsbestimmungen in vielen Branchen (z.B. Spielzeugindustrie, Medizin- und Pharmatechnik, Lebensmitteltechnik) ist aber der Einsatz von Plastigelen verboten bzw. eingeschränkt. In diesen Fällen

übernehmen thermoplastische Elastomere oder Blends die Rolle weichelastischer Polymere.

### 1.5.4.2 Brennbarkeitsminderung durch Flammenschutzmittel (FSM)

Ein großer Teil der Polymere ist brennbar mit unterschiedlicher Brandausbreitungsgeschwindigkeit. Viele Anwendungen fordern nach Zündung ein Selbstverlöschen des Brandes ohne nennenswerte Brandausbreitung, also möglichst auch kein brennendes Abtropfen. Bei dieser Forderung muss aber berücksichtigt werden, dass sich alle organischen Stoffe bei entsprechend hohen Temperaturen thermisch zersetzen und toxische Brandgase, Rauch sowie ggf. Glut bilden können. Brennbarkeitsminderung sollte die Verringerung der Zündbereitschaft und die Reduzierung der Brandausbreitung der Polymere zum Ziel haben.

Einige Polymergruppen erfüllen auf Grund ihrer chemischen Struktur (inhärenter Flammenschutz) bereits diesbezügliche Anforderungen. Dazu gehören die halogenhaltigen Polymere (z.B. Polyfluorcarbone, Vinylchloridpolymere, chlorierte Polymere) sowie Polymere mit aromatischen Molekülkettenelementen (z.B. Arylpolymer, Polyimide, LCP).

Brennbarkeitsminderung durch Zugabe von FSM (additiver Flammenschutz ergibt sogenannte FR-Typen) kann auf eine breite Palette der FSM zugreifen, die nach unterschiedlichen chemischen und physikalischen Wirkprinzipien funktionieren. Bezuglich der Einzelheiten sei auf die Fachliteratur verwiesen. Organische FSM sind halogen-, phosphor- und stickstoffbasierte Verbindungen, deren Wirkung u.U. durch Zusätze von Oxiden (z.B. Antimonoxid) synergistisch erheblich verstärkt werden kann. Für anorganische FSM ist als wichtigster Vertreter Aluminiumhydroxid zu nennen.

Im Vergleich zu den meisten Funktionsadditiven müssen FSM mit relativ hohen Anteilen eingesetzt werden, um erwünschte Wirkungen zu erzielen. Dadurch werden die Eigenschaften (z.B. mechanische, elektrische, thermische Eigenschaften) der Polymeren u.U. deutlich beeinflusst. Aus diesem Grund wird z.B. für POM keine FSM-Ausrüstung angeboten. Insbesondere sind gesundheitsgefährdende FSM von der Anwendung häufig ausgeschlossen.

## 1.5.5 Polymermischungen und Werkstoffkombinationen

### 1.5.5.1 Polymermischungen (Blends)

Die Herstellung von Polymermischungen (Polyblends, Blends, Polymerlegierungen) ist fast so alt wie die Kunststofftechnik. Gezielte stoffliche Modifizierung durch Blends zur Verbesserung der Verarbeitungs- und Anwendungseigenschaften

ten der Kunststoffe war naheliegend. Zunächst war die Schlagzähmodifizierung durch Kautschukkomponenten ein Schwerpunkt (elastomermodifizierte Polymere). Heute werden Polymerblends für das ganze Feld der Eigenschaftsverbesserung genutzt, wie z.B. Erhöhung der Wärmeformbeständigkeit, Verringerung der Spannungsrißbildung, Lackierbarkeit, Galvanisierbarkeit, Brennbarkeitsminde rung. Die Nutzung der Blendtechnologie für thermoplastische Elastomere sei besonders betont. Im Zusammenhang mit dem verstärkten Stoffrecycling hat die Blendtechnik einen weiteren Impuls erfahren.

### **Verträglichkeit und Phasenstruktur**

Aus energetischen Gründen ist die Mischbarkeit von Makromolekülen stark eingeschränkt, so dass homogene Mischungen auf molekularer Ebene (homogene Blends) als Einphasensysteme die Ausnahme sind, z.B. (PPE+SB). Die Bildung eines morphologischen Mehrphasensystems (heterogene Blends) ist nicht von vornherein ungünstig, da viele nützliche Eigenschaften der Blendkomponenten erhalten bleiben. Voraussetzung für qualitativ hochwertige Blends ist eine stabile Blendmorphologie. Dispergierte Phase und Matrix müssen in gleichmäßiger Verteilung bei guter Phasenadhäsion vorliegen. Nach dem Stand der Misch- und Zerteiltechnik sind u.U. „Phasentröpfchen“ bis zur Wellenlänge des sichtbaren Lichts erreichbar (transparente Blends). Zur Verbesserung der Mischbarkeit und Adhäsion werden verschiedene Methoden praktiziert:

- Ausgangsverträglichkeit der Blendkomponenten aufeinander abstimmen.
- Verfahrenstechnische Optimierung der Blendtechnologie
- Chemische Modifizierung durch Ionenbindungen, durch dynamische Phasenvernetzung, partielle Ppropfcopolymerisation u.a.
- Zugabe von Haftvermittler (Compatibilizer).
- Bildung von Durchdringungsnetzwerken (IPN) bei vernetzten Polymeren.

### **Thermoplastische Verarbeitbarkeit von Blends**

Die Verarbeitbarkeit von Polymermischungen aus Sicht der Verträglichkeit der Komponenten ist der nachfolgenden Zusammenstellung zu entnehmen. Diese Angaben gelten auch für Kombinationen mit Rezyclaten. Bei Anwendung von Haftvermittlern (C) ist zu prüfen, ob neben der meist guten Verarbeitbarkeit auch die geforderten Anwendungseigenschaften erfüllt sind. Der Autor hat im Zusammenhang mit PA-PP-Blends z.B. festgestellt, dass geringste Dehnungen des Materials die Adhäsionskräfte überfordern können (Rissbildung).

# Index

## A

Abmessungsbereiche molekularer und morphologischer Strukturelemente 29  
Abschätzkonzept für die Verschleißstandzahl 260  
Abschätzung des Temperatur-Zeit-Zusammenhangs 67  
Ähnlichkeitsskennzahlen 203  
Aktuelle Viskosität 229  
Alternativwerkstoffe 49  
Aminoplaste 18  
Amorph 22  
Amorphe Thermoplaste mit Glastemperaturen über 30 °C 285  
Amorphe Thermoplaste und thermoplastische Elastomere mit Glastemperaturen unter 15 °C 286  
Anforderungen 50  
Anwendungsbedingte Maßänderungen 118  
Anwendungsbedingte Maßverschiebungen 120  
Anwendungsbedingte Maßverschiebungen und Maßstreuungen der Passteile 405  
Arbeitsplatzstruktur 258  
Auftragsstückzahlen 257  
ausgewählte thermoplastische Copolymeren 18  
Ausschussabschätzung 258  
Ausschuss- und Qualitätssicherungskosten 271  
Äußere Weichmachung 43  
Auswahl der Verarbeitungsparameter 308

## B

Basisdaten 257  
Basisdaten für Kunststoffe 322  
Basisgeometrieelemente 294  
Basisstrukturen der Polymere 28  
Beanspruchungsarten 132  
Belastungsgrößen 401  
Berechnung der dielektrischen Verluste von Schaumstoffen 106  
Berechnung der optimalen Fachzahl 272  
Berechnung der Wärmeleitkennzahlen 111  
Berechnungsdaten für ausgewählte Biegelastfälle 391  
Berechnungsgegenstand 319  
Berechnungsverfahren für den Heizwert von Mischwerkstoffen 102  
Berechnung von biegesteifen Verbundplattenstreifen 388  
Berechnung von Kunststoffstirnradgetrieben 319  
Beständigkeitsskriterien 53  
Beständigkeitsskriterien der Kunststoffe 56  
Bestimmung der rheologisch repräsentativen Fluidtemperatur 237  
Bestimmung des Reibungskoeffizienten 324  
Bestimmung gewinnoptimaler Losgrößen 274  
Bestimmungsgrößen der Kanäle 207  
Beulen 151  
Beulen dünnwandiger Hohlzylinder durch Radialdruckbeanspruchung 178  
Beulen dünnwandiger Hohlzylinder durch Radialdruckbeanspruchung bei elastischer Außenbettung 182

Beulen dünnwandiger und isotroper Kugelschalen durch radiale Druckbeanspruchung 187  
 Beulen isotroper Platten durch konstante Randdruckspannungen 171  
 Beulen oder Drillknicken dünnwandiger Hohlzylinder durch Torsionsbeanspruchung 174  
 Beulen oder Knicken dünnwandiger Hohlzylinder durch Axialdruckbeanspruchung und/oder Biegebeanspruchung 176  
 Beulen oder Knicken dünnwandiger Hohlzylinder durch kombinierte Beanspruchung 179  
 Beulen oder Knicken dünnwandiger Schalen 173  
 Beulen offener Zylinderschalen durch Axialdruckbeanspruchung 181  
 Beulen ringversteifter Hohlzylinder durch Radialdruckbeanspruchung (Manteldruck) 183  
 Beulen und Knicken von Kugelschalen 180  
 Beulen von Hohlzylindern mit profilierten und/oder mehrschichtigen Wänden durch Radialdruckbeanspruchung (Manteldruck) bei bekannter Ringsteifigkeit 186  
 Beulen von Platten und Plattenstreifen 169  
 Beulen von Rechteckplatten 169  
 Beulen von Rechteckplatten durch konstante Randschubspannungen 172  
 Beulstabilität 151  
 Bewertung der UV-Stabilität 70  
 Biegendrillknicken 154  
 Biegesschnappverbindungen einschließlich segmentierter Zylinderschnappverbindungen 347  
 Biot-Zahl 202  
 Blendstrategie 246  
 Brennbarkeit 99

**C**

Cellulosederivate 13  
 Chemische Vernetzungsstruktur 26  
 Copolymer 5

**D**

Datenspezifikation 132  
 Deformationstyp 139  
 Deformationszustand für Instabilität 151  
 Dehnbarkeit 91  
 Dichten und Wärmeleitzahlen für anorganische Füll- und Verstärkungsstoffe 39  
 dielektrischer Verlustfaktor 105  
 Dielektrizitätszahl 105  
 Dipol- oder Orientierungskräfte 10  
 Dispersionskräfte 9  
 Druckströmung in beheizten Kanälen 233  
 Duroplastharze 18

**E**

Eigenschaftsaddition 249  
 Eigenschaftsbild der Schaumstoffe 42  
 Eigenschaftsspezifizierung 51  
 Einpresskräfte 408  
 Einspannfälle und Einspannwerte 155  
 Einspritzdruck 310  
 elastische Näherung 132  
 elektrostatische Aufladung 104  
 Elementarvorgang des Scherfließens 227  
 Emissionsgradrichtwerte 198  
 energieelastisch 35  
 Energierecycling 239  
 Energieteilkostensatz 267  
 Entformungsfaktoren 311  
 Entformungstemperatur 310  
 Entformung von funktionsbedingten Hinterschneidungen 359  
 entropieelastisch 35  
 entropieelastische Rückverformungskräfte durch strömungsbedingte Molekülorientierung 232  
 Entropieelastizität 26  
 Entsorgungsmethoden 239  
 Ersatzursprungsmodul 146  
 Erzwungene Konvektion 200

**F**

- Faserverstärkung 41  
Fertigungsgenauigkeit nach DIN 16742 und DIN ISO 20457 116  
Fertigungskosten 270  
Fertigungsvarianten 255  
Festigkeit 136  
Filmkondensation 220  
Flächige Bauteile (Platten, Membranen, Plattenstreifen) 379  
Flammschutzmittel 44  
Freie Konvektion 200  
Freiluftklimamodelle 125  
Freistrahlbildung 234  
Fügebedingungen 398  
Fugenpressung 403  
Füll- und Verstärkungsstoffe 38  
Funktionsadditive und chemische Modifizierung 36  
Funktionskombinationen für Schnappverbindungen 370  
Funktionsnachweis für gekrümmte Biegef Federn 351  
Funktionsnachweis für gerade Biegef Federn 349

**G**

- Geometrieelemente 401  
Geometrie- und Betriebsdaten 327  
Geometrie und Reibkraftübersetzung von Rastelementen 342  
geschlitzte Zylinderschnappverbindungen 352  
geschlossene Kugelschnappverbindungen 357  
geschlossene Zylinderschnappverbindungen 353  
Geschlossene Zylinderschnappverbindungen (Ringschnappverbindungen) für große Lösekräfte 365  
Gestaltungsbeispiele 359  
Gestaltung von Kugelschnappverbindungen 369  
Gewaltbruchsicherheit 141  
Grashofzahl 203  
Grundsatzfragen (FAQ) 133, 320  
Gummielastizität 26, 232

**H**

- Haftreibungskoeffizient 399  
Heizwert 101  
Heizwerte 240  
Hydrothermische Beständigkeit 68

**I**

- Imperfektionsbeiwert 152  
Induktionskräfte 10  
Invarianter Scherrelaxationsansatz 231

**K**

- Kalkulation der Stückkosten 255  
Kanalgrundformen 207  
Keimbildung 22  
Kippen 151  
Kippen biegebeanspruchter Träger 158  
Klimabegriffe und Klimagrößen 123  
Knicken 151  
Knick-, Kipp- und Beulsicherheitsfaktor 152  
Kohäsionsenergiedichte 72  
Konformation und Aggregation der Makromoleküle 19  
Konstruktionshinweise 341  
Konzepte einer Werkstoffvorauswahl 52  
Körperparametrische 201  
Kovalente Grundstrukturen 5  
Kreismembranplatten 379  
Kreismembranplatten mit gleichverteilter Druckbeanspruchung 380  
Kriechneigung 83  
Kriechstromfestigkeit 107  
Kristallin 22  
Kristallwachstum 22  
Kritische Knitterspannung 189  
Kritische Stauchungen 153  
Kritische Zellbeulspannung 190  
Kühlzeit 281  
Kühlzeitberechnungsgleichungen 314  
Kühlzeitbestimmende Angussgeometrie 307  
kühlzeitbestimmende Formteilpartie 306

**L**

- Leistungsverluste 329  
 Leitfähigkeitsadditive 105  
 Lichtdurchlässigkeit 98  
 Lineare Polyarylester 16  
 Lineares Modell 250  
 Linearitätsfaktoren 140  
 Logarithmisches Modell 250  
 Löslichkeitsparameter 30  
 Löslichkeit und Quellbarkeit der Polymere 30

**M**

- Maschinenbedienung 258  
 Maschinenbelegung 258  
 Maschinenlaufzeit 258  
 Maschinenstundensätze 265  
 Maschinenteilkostensatz 265  
 Maßberechnungen für den Übergang  
   Teileanwendung und Teilefertigung\ 119  
 Maßbezugsebenen der Formteilmaßhaltigkeit  
   113  
 Massestemperatur 310  
 Materialkosten 269  
 Mathematische Modellierung 248  
 Maximalfugenpressung 404  
 Maximalstrategie 247  
 Maximal zulässige Zahnflankentemperatur  
   324  
 Mechanische Dämpfung 83  
 Medienbeständigkeit 57  
 Mehrkomponentenspritzgießen 313  
 Mehrkomponentenwerkstoffe 47  
 Membranplattenberechnung 380  
 Mesomorph 23  
 Metalle 323  
 Mindestfugenpressung 403  
 Minimalstrategie 246  
 Mittlere Wandtemperatur 202  
 Molekulare und morphologische Ordnungsstrukturen 21  
 Moleküllängenrelation 6  
 Molekülmassen 6  
 Molekülmasseverteilung 7  
 Molkohäsion 9  
 MuCell – Schaumstoffe 42

**N**

- Nachschwindung 121  
 Nahordnungsbereich der Moleküle 21  
 Normen zur Kennzeichnung von Polymeren  
   3  
 Nußeltgleichungen 203  
 Nußeltzahl 203

**O**

- Optimaler Füllungsgrad der Polymere 40  
 Orientierung im Festzustand 34  
 Orientierung im thermoplastischen Zustand  
   34  
 Originalmaterial 242  
 Örtliches Beulen von Stäben 162

**P**

- Papierwabenstoffe 143  
 Phenoplaste 18  
 Physikalische Vernetzungsstruktur 26  
 plastisch 35  
 Plattenstreifen als Stützkernverbundbauteile  
   380  
 PolSelec 52  
 Polyacetale 12  
 Polyaddition 4  
 Polyalkenamere 12  
 Polyalkylenterephthalate 16  
 Polyamide (PA) und lineare Polyurethane  
   (PUR) 14  
 Polyarylether 12  
 Polyaryletherketone 12  
 Polyarylethersulfone 14  
 Polyarylsulfide 14  
 Polycarbonate 16  
 Polycycloolefine 12  
 Polydiene 12  
 Polyether 12  
 Polyhydroxybenzoate 16  
 Polyimide 17  
 Polykondensation 4  
 Polymerdatei 283  
 Polymere 47  
 Polymerisation 4  
 Polymermischungen (Blends) 44

Polymerstrukturmatrix 53  
Polymethylene 11  
Polyurethanhartschaumstoffe 142  
Prandtlzahl 203  
Pressfugendurchmesser 402  
Produkte aus unterschiedlichen Werkstoffkomponenten 47  
p-v-T-Verhalten von Thermoplasten 32

## Q

Quellströmung 234  
Quellung 63  
Querkontraktionszahl 140  
Querschnitte mit geschlossener Umrandung 210

## R

Raumklimamodelle 126  
Raumnutzungsteilkostensatz 266  
Rechteckmembranplatten 379  
Rechteckmembranplatten mit gleichverteilter Druckbeanspruchung und gleicher Randdeinspannung am Umfang 382  
Reduktionsfaktoren 138  
Referenztemperatur 215  
Regeln und Richtlinien für das recycling-orientierte Entwickeln von Kunststoffteilen 244  
Reibung 94  
Reibungskoeffizient, Deformationsmechanik, Festigkeitsnachweis 344  
Reibungskoeffizienten 94 f.  
Reynoldszahl 203  
Rheologische Stoffansätze 229  
Richtlinien für die Kunststoffvorauswahl 52  
Richtwertbereiche kritischer Dehnungen 90  
Ringspaltquerschnitte 212  
Rippengestaltung 385  
Rippenwirkung von Aufspannplatten 223  
Rücklaufmaterial 242

## S

Sandraugkeitswert 212  
Sauerstoffindex 99  
Schaumstoffe 41

Scheitelbeulen 154  
Scheitelknicken biegebeanspruchter Träger mit Hohlzyylinderquerschnitt 162  
Scherströmung mit Randschichterstarrung 234  
Schlagzähigkeit 91  
Schlankheitsgrad 152  
Schmelzenbruch 232  
Schmierstoffeinsatz 326  
Schnapphakengestaltung zur Reduzierung von Füge- und Lösekräften und zur Vermeidung unzulässiger Scherdeformationen 362  
Schnappverbindungen 339  
Schnappverbindungen als Verschluss-elemente 368  
Schubmodul 140  
Sekantenmodul 135  
Shorehärte 136  
Sicherheitsnachweise für Kunststoffzahnräder 333  
Spaltquerschnitte 221  
Spannungs-Dehnungsdiagramme nach DIN EN ISO 527 133  
Spannungsrissbildung 84  
Spezialtypen durch Werkstoffmodifizierung 54  
Spezifischer Durchgangswiderstand 104  
Spritzlinggeometrie 294  
Stabilitätsnachweis 357  
Stabilitätsnachweise 408  
Stabilitätsnachweise für Stützkernverbundbauteile 188  
Steifigkeitserhöhung durch Füll- und Verstärkungsstoffe 40  
Steifigkeits- und Festigkeitsdaten für Kunststoffe 325  
Steifigkeit und Härte 73  
Stoffdaten der Formmassen und Werkzeugkonturwerkstoffe 292  
Stoffdaten des Konvektionsmediums 204  
Stoffkreisläufe 239  
Stoffrecycling 239  
Strahlenbeständigkeit 68  
Strömungstemperaturfeld ohne Randschichterstarrung 237  
Strukturierung zeitlicher Fertigungsabläufe 275  
Strukturschaumstoffbauteile 145  
Strukturschaumstoffe 144

Strukturviskosität 232  
Stützkernwerkstoffe 142

## T

Tangentenmodul 135  
Teilkristalline und mesomorphe Thermoplaste sowie teilkristalline thermoplastische Elastomere 287  
Temperaturausgleichszahl 202  
Temperaturfeldbeiwert 202  
Temperaturleitzahl 109  
Thermische Zustände und Übergangsbereiche von Polymeren 31  
Thermische Zustandsänderungen der Polymere 24  
Thermoplastische Verarbeitbarkeit von Blends 45  
Thermoplastspritzgießen 281  
Toleranzdaten 400  
Tolerierung der Fügedurchmesser 406  
Torsionsschnappverbindungen 344

## U

Überlagerung von Scher- und Dehnströmungen beim Spritzgießen 236  
Überschlagsberechnung der Formstoffsteifigkeit 75  
Überströmgeschwindigkeiten und Überströmlängen 216  
UL 94 der Underwriters Laboratories 99  
Ursprungsmodul 136

## V

Verarbeitungskreislaufmodell 241  
Verarbeitungsschwindung 114  
Verbindungsprinzip und Verbindungsarten 339  
Verfahrenszuordnung 257  
Verformungsbegrenzung und Sicherung von Schnappverbindungen 366  
Vergleichsstückkosten 268  
Verringerung der Hakenbeanspruchung und vereinfachte Montagemöglichkeiten durch Mehrfachhaken 360  
Verschleiß 94

Verschleißstandzahl 260  
Verschleißverhalten (Abrasionsverschleiß) fester Zusatzstoffe 39  
Verträglichkeit und Phasenstruktur 45  
Verzweigung und Steifheit 7  
Vollständiges Fließdiagramm für strukturviskose Medien 228  
Vorauswahl 50

## W

Wärmealterungsbeständigkeit 65  
Wärmedehnung 77  
Wärmedurchgang 193  
Wärmeeindringzahl 109  
Wärmeformbeständigkeit 65, 78, 137  
Wärmekapazität 109  
Wärmekonvektion 193  
Wärmeleitung 193  
Wärmeleitzahl 109  
Wärmestrahlung 193  
Wärmestromdichte 193  
Wärmeträgermedien 195  
Wärmeübergang 193  
Wärmeübergangswiderstand 193  
Wärmeübergangszahlen 193, 330  
Wasseraufnahme 62  
Wassersättigungskonzentration 63, 129  
Wasserstoffbrückenkräfte 10  
Werkstoffauswahl 49  
Werkstoffdaten 400  
Werkstoffdichte 72  
Werkstoffentscheidung 50  
werkstoffliches Recycling 239  
Werkstoffliche Voraussetzungen für Kunststoffrecycling 243  
Werkzeugbedarf und Maschinenbelegungszeit 273  
Werkzeugkonturtemperatur bei Einspritzbeginn 313  
Werkzeugkosten 270  
Werkzeugtemperierung 308  
Werkzeugträgerstationen 259  
Wiederverarbeitungsstrategien 246  
wirtschaftlicher Fasergehalt 147  
Wirtschaftlichkeitsvergleiche 255  
Witterungsbeständigkeit 70  
Wölbkrafttorsion 157

**Z**

Zahnflankenpressung 332  
Zahnflankentemperatur 331  
Zahnfußspannungen 329  
Zahnmassetemperatur 330  
Zahnverformung 332  
Zeitabhängiges Deformationsverhalten 35  
Zeitverlaufarten 132

Zulässige Dehnung 140  
Zulässige Spannungen 141  
Zulässige Stauchung 141  
Zusatzstoffdatei 290  
Zwischenmolekulare Kräfte (ZMK) 9  
Zykluszeit 281  
Zykluszeitberechnung 315  
zylindrische Pressverbindung 397