

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

Vorwort	XXI
Der Autor	XXIII
1 Struktur – Eigenschaftsbeziehungen der Polymere	1
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
2	Systematische Kunststoffauswahl für Formstoffe	49
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 (μ)	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
3	Überschlägige Bestimmung deformationsmechanischer Kennwerte von Kunststoffen	131
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

4	Nachweis der Knick-, Kipp- und Beulstabilität für Leichtbaukonstruktionen	151
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 ringverstärkter 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
5	Bestimmung von Wärmeübergangszahlen für Wärmeübertragungsvorgänge der Polymerverarbeitung und -anwendung	193
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 Sandraugigkeitskennwerte 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
6	Ausgewählte rheologische Grundlagen für Thermoplastschmelzen	227
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
7	Grundlagen des werkstofflichen Recycling von Kunststoffen	239
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
8	Orientierende Wirtschaftlichkeitsvergleiche für Fertigungs- varianten zur Herstellung von Spritzgieß- und Pressteilen ...	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	Kanturoberflächenbeschaffenheit (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 (kvl)	275
8.9	Demonstrationsbeispiel	277
9	Bestimmung der Zykluszeit für das Thermoplastspritzgießen	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 (ϑ_M) und Einspritzdruck (p_s)	310

9.5.3	Entformungstemperatur	310
9.5.4	Festlegung der Werkzeugkonturtemperatur bei Einspritzbeginn (ϑ_w)	313
9.5.5	Mehrkomponentenspritzgießen	313
9.6	Kühlzeitberechnungsgleichungen	314
9.7	Zykluszeitberechnung	315
9.8	Berechnungsbeispiele	316
10	Berechnung von Kunststoffstirradgetrieben	319
10.1	Berechnungsgegenstand	319
10.2	Werkstoffdaten	322
10.2.1	Basisdaten für Kunststoffe und Metalle	322
10.2.2	Maximal zulässige Zahnflankentemperatur (ϑ_{Fmax})	324
10.2.3	Bestimmung des Reibungskoeffizienten (μ)	324
10.2.4	Steifigkeits- und Festigkeitsdaten für Kunststoffe (E_K , ν_K , σ_{FP} , σ_{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
11	Berechnung und Gestaltung von Schnappverbindungen	339
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	Schnapphaken-gestaltung 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
12	Berechnung von biegebeanspruchten Platten und Plattenstreifen	379
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_{bmax}) 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
13	Berechnung und Gestaltung zylindrischer Pressverbindungen	397
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
Index	413

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 Ausnahmefällen werden Handelsnamen angegeben, sofern dies für die Spezifizierung der Kunststoffe hilfreich ist. Davon unberührt ist die Notwendigkeit der detaillierten Typangabe (Liefernamenklatur) 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

Struktur – Eigenschafts- beziehungen 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.

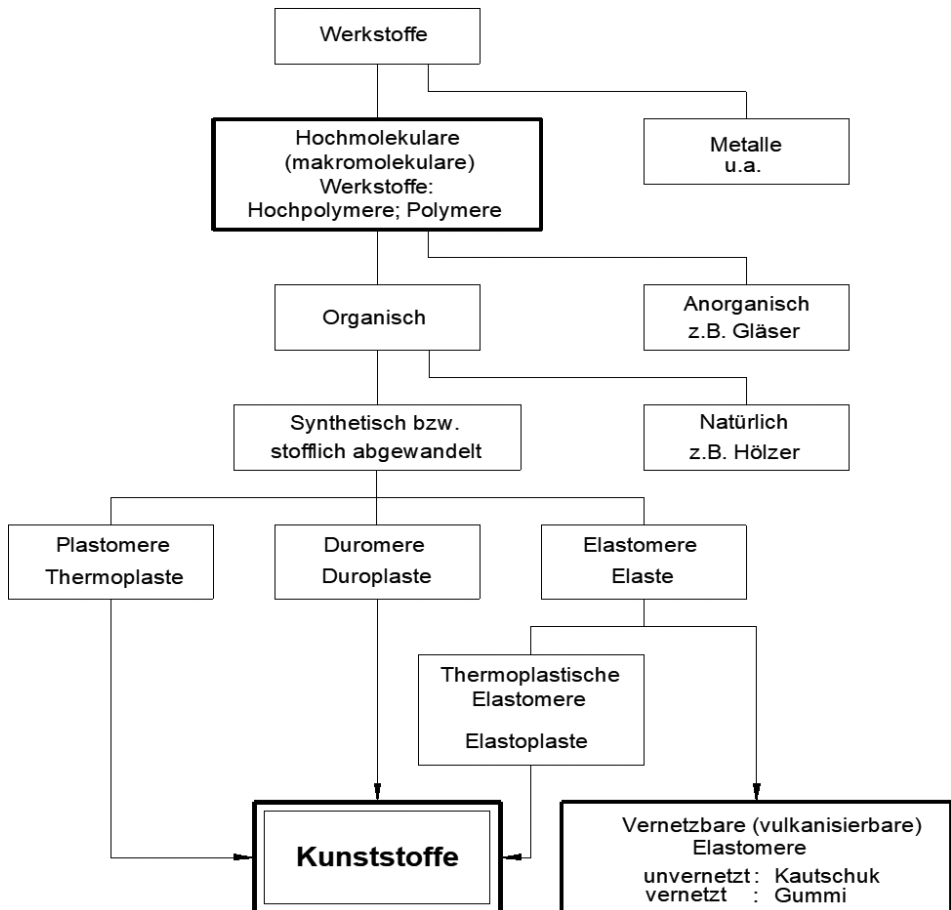
Die wichtigsten Quellen des vorliegenden Kapitels sind folgende Veröffentlichungen:

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

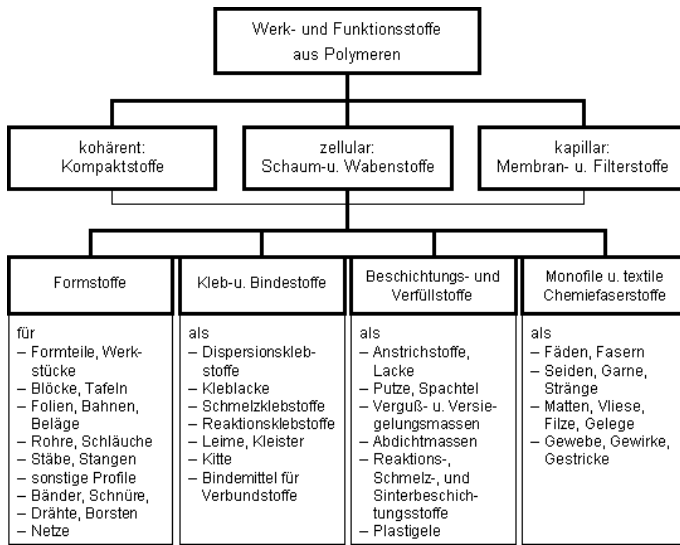
Meyer, B.-R.: Kunststoffeigenschaften und deren Einfluss auf die Formteile unter Berücksichtigung der Maßhaltigkeit. In: Maßhaltige Kunststoff-Formteile, Carl Hanser Verlag, München 2013/2019.

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-Polymere 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

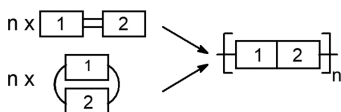
Molekülzusammensetzung der Polymere

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.

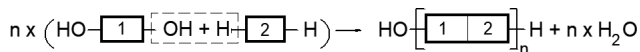
Organische Polymere werden synthetisch hergestellt (meist aus dem Rohstoff Erdöl) oder aus Biopolymeren (z.B. Stärke, Cellulose, Eiweiß) stofflich abgewandelt.

Polymerbildungsreaktionen

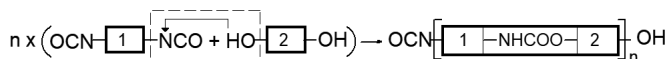
Polymerisation: Monomere verknüpfen sich durch Aufspaltung von Mehrfachbindungen oder Ringöffnung über eine Kettenreaktion zu Polymerisaten.



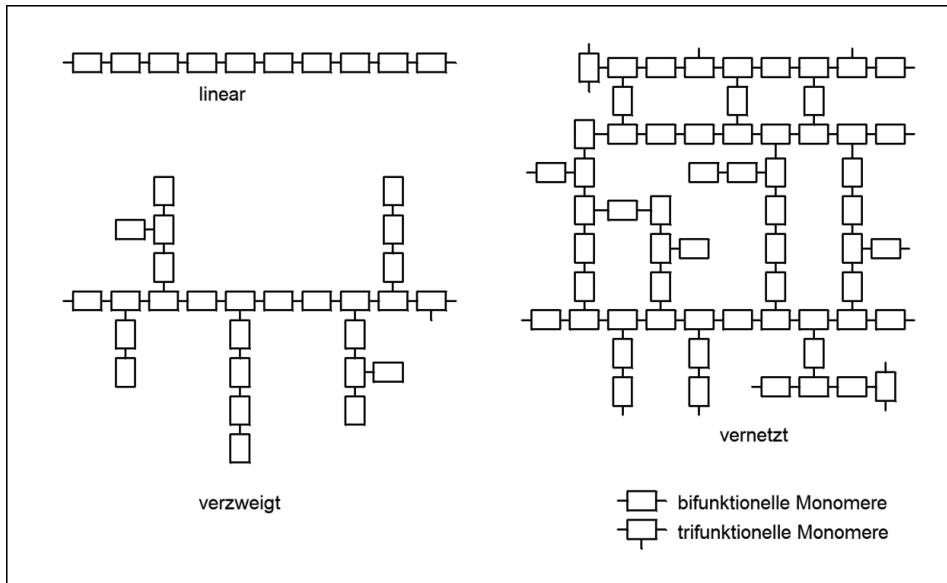
Polykondensation: Monomere verknüpfen sich durch Abspaltung von Reaktionsprodukten (z.B. Wasser) über eine Stufenreaktion zu Polykondensaten (z.B. Veresterung).



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



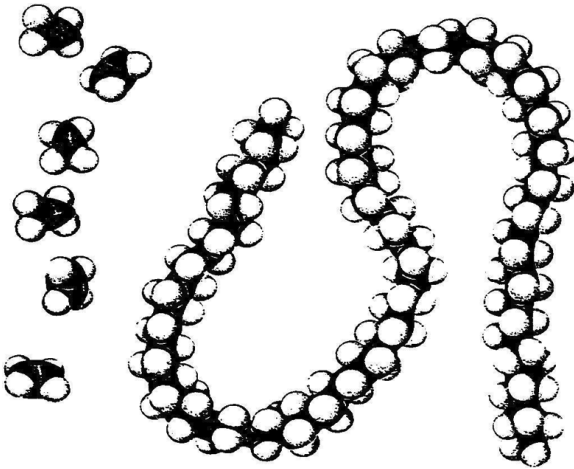
Konstitution thermoplastischer Copolymere

Random- oder statistische Copolymere		Statistische Monomeranordnung
Sequenz-Copolymere	$\left[\text{Kasten} \text{ schraffiert Kasten} \right]_n$ $\left[\text{Kasten} \text{ Kasten schraffiert} \right]_n$	Periodische Anordnung von Monomersequenzen
Segmentblock-Copolymere	$\left[\left(\text{schraffiert} \right)_x \left(\text{Kasten} \right)_y \right]_n$	Segmentierte Anordnung von homopolymeren Molekülblöcken
Teleblock-Copolymere	$\left[\text{Kasten} \right]_x \left[\text{schraffiert} \right]_y \left[\text{Kasten} \right]_x$ $\left[\text{Kasten} \right]_x \left[\text{schraffiert} \text{ schraffiert} \right]_y \left[\text{Kasten} \right]_x$	Anordnung von endständigen Molekülblöcken gleicher Monomerart an einem homo- oder copolymeren Mittelblock
Pfropf-Copolymere		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-Copolymere 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

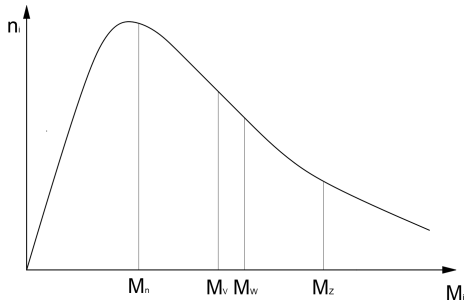
6×10^{23} Moleküle eines Stoffes (1 mol) wiegen:

- **bei niedermolekularen Stoffen:**
 - wie 2 g H_2 *oder*
 - wie 18 g H_2O *oder*
 - alle anderen niedermolekularen Stoffe bis 500 g/mol
- **bei Oligomeren¹⁾:** über 0,5 bis 10 kg/mol
- **bei Polymeren²⁾:**
 - übliche Thermoplaste über 10 kg/mol bis 1 t/mol *oder*
 - Spezial- und Biopolymere über 1 t/mol

¹⁾ Oligomere sind Vorstufenverbindungen echter Polymere.

²⁾ 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 : Zentrifugemittelwert



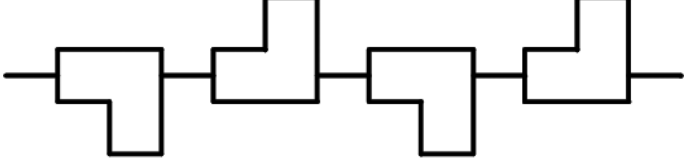
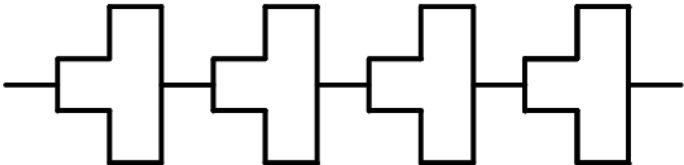
Vielfalt und Streubreite der Molekülmasse sowie die daraus je nach Prüfverfahren abgeleiteten Molekülmassemittelwerte definieren komplexe Einflüsse auf das Fließverhalten (Rheologie) sowie auf thermische und mechanische Eigenschaften. Die Uneinheitlichkeit U ist als Maß der Streubreite der Molekülmassen 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 (sperrige) 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 erklärbar. 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 fluktuierenden Ladungsschwerpunkten von Atomorbitalen (temporäre Atomdipole). Dispersionskräfte sind bei allen Stoffen mit einem gleichförmigen Kraftfeld schwacher Wechselwirkungen wirksam. Temperatureinfluss gering. Beitrag zur Molkohäsion meist groß.

■ **Induktionskräfte:**

- Wenig gerichtete, induzierte Anziehung zwischen permanenten Molekülgruppendifolen und polarisierbaren Molekülteilen mit „verschiebbaren“ Elektronen (z. B. π -Elektronen in Aromaten und in konjugierten Mehrfachbindungen). Temperatureinfluss und Beitrag zur Molekölhäsion meist gering.

■ **Dipol- oder Orientierungskräfte:**

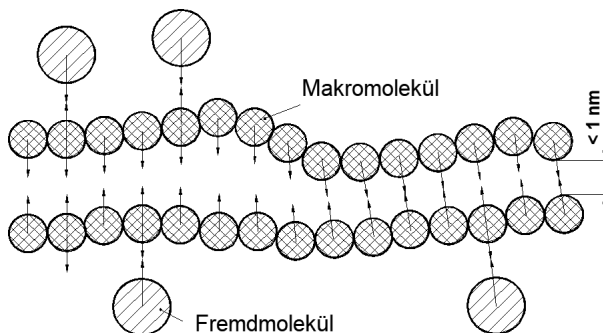
- Gerichtete Anziehung zwischen permanenten Molekülgruppendifolen. Temperatureinfluss auf die Richtkraftwirkung groß. Beitrag zur Molekölhäsion abhängig von Dipolkonzentration und Dipolstärke, u. U. groß.

■ **Wasserstoffbrückenkräfte:**

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


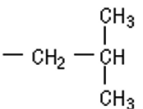
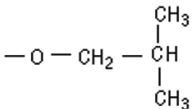
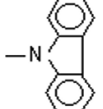
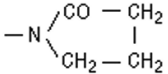
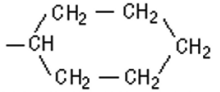

Es sei vermerkt, dass für ZMK unterschiedliche Begriffe und Zuordnungen verwendet werden, auf die hier nicht eingegangen wird. Sind ausschließlich Dispersionskräfte ohne messbares Dipolmoment wirksam, werden diese Stoffe als unpolar eingestuft. Stoffe mit messbaren Dipolmomenten infolge wirksamer Richtungskräfte (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, Benetzbarkeit, 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

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

1.2.3.2 Polydiene, Polyalkenamere, Polycycloolefine (COC)

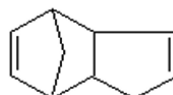
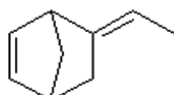
1,4-Polydiene	$\left[\text{CH}_2 - \underset{\text{R}}{\underset{ }{\text{C}}} = \text{CH} - \text{CH}_2 \right]_n$	R: — H	Polybutadien (BR)
		— Cl	Polychloropren (CR)
		— CH ₃	Polyisopren (IR), Naturkautschuk (NR)

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

Polycycloolefine, Polycyclodiene

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

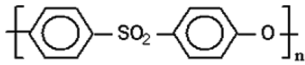
Cycloolefine:



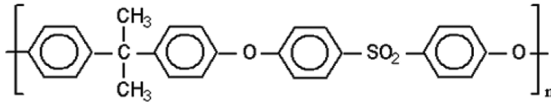
Norbomen (N) Ethylidennorbomen (EN) Dicyclopentadien (DCP)

1.2.3.3 Polyacetale, Polyether, Polyarylether, Polyaryletherketone

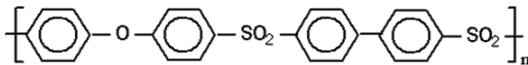
Polyacetale	$\left[\text{CH}_2 - \text{O} \right]_n$ Polyformaldehyd, Polyoxymethylen (POM)	$\left[\underset{\text{CH}_3}{\underset{ }{\text{CH}}} - \text{O} \right]_n$ Polyacetaldehyd
Polyether	$\left[\text{CH}_2 - \text{CH}_2 - \text{O} \right]_n$ Polyethylenoxid (PEOX)	$\left[\text{CH}_2 - \underset{\text{CH}_2\text{Cl}}{\underset{ }{\text{C}}} - \text{CH}_2 - \text{O} \right]_n$
	$\left[\underset{\text{CH}_3}{\underset{ }{\text{CH}}} - \text{CH}_2 - \text{O} \right]_n$ Polypropylenoxid (PPOX)	Poly-3,3-bis-chlormethyl- propylenoxid (PCPO)
Polyarylether	$\left[\text{C}_6\text{H}_4 - \text{O} \right]_n$	$\left[\text{C}_6\text{H}_2(\text{CH}_3)_2 - \text{O} \right]_n$
	Polyphenylether	Poly-2,6-dimethylphenylenether (PPE)
Polyaryletherketone	$\left[\cdots - \text{O} - \text{C}_6\text{H}_4 - \cdots - \text{CO} - \text{C}_6\text{H}_4 - \cdots \right]_n$	
	Ether (E) Keton (K)	
Benennung nach Aufeinanderfolge der E- u. K-Gruppen Beispiele: PEK, PEEK, PEKK, PEEKK, PEKEKK		

Polyarylethersulfone, Polyarylsulfide

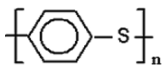
Polyethersulfon (PES)



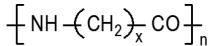
Bisphenol A-Polyethersulfon (PSU)



Polyphenylenethersulfon (PPSU)

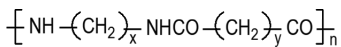


Polyphenylensulfid (PPS)

1.2.3.5 Polyamide (PA) und lineare Polyurethane (PUR)**Homopolyamide aus Aminosäuren oder deren Lactame**

Beispiele	PA _z
Polycaprolactam	PA6
Poly 11aminoundecanamid	PA 11
Polylaurinlactam	PA 12

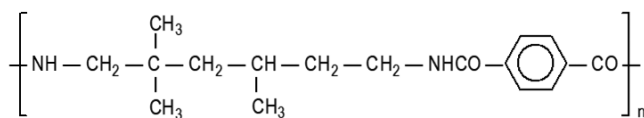
Z = C-Zahl der C Aminosäure bzw. des Lactams (Z = x+1)

Aliphatische Homopolyamide aus unverzweigten Diaminen u. Dicarbonsäuren

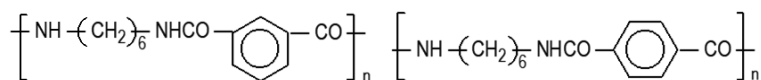
Beispiele	PA _{Z1Z2}
Polytetramethylenadipinamid	PA46
Polyhexamethylenadipinamid	PA66
Polyhexamethylenadipinamid	PA69
Polyhexamethylensebacinamid	PA6 10
Polyhexamethylendodecanamid	PA6 12

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

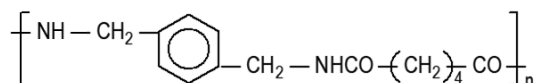
Z2 = C-Zahl der Dicarbonsäure (Z2 = y+2)

Aromatische Homopolyamide (Polyarylamide)

Polytrimethylhexamethylenterephthalamid (PANDT (PA6-3-T))



Polyhexamethylenisophthalamid (PA6I) Polyhexamethylenterephthalamid (PA6T)



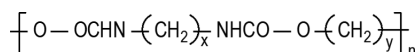
Poly-m-xylylenadipinamid (PAMXD6)

Kurzzeichenbildung wie aliphatische Polyamide, wobei für verzweigte aliphatische Diamine sowie für aromatische Diamine und Dicarbonsäuren Buchstabensymbole 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

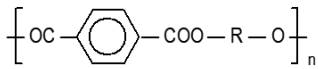
Polyurethane aus aliphatischen Diisocyanaten und Diolen

x = 6: 1,6-Hexamethylendiisocyanat

x = 4: 1,4-Butandiol

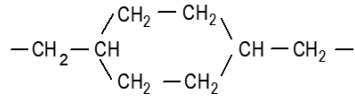
1.2.3.6 Lineare Polyarylester:

Polyalkylenterephthalate



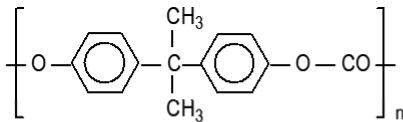
R: $-(\text{CH}_2)_2-$
Polyethylenterephthalat (PET)

$-(\text{CH}_2)_4-$
Polybutylenterephthalat (PBT)

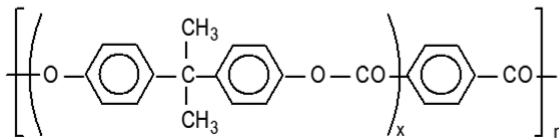


Polycyclohexylterephthalat (PCT)

Polycarbonate

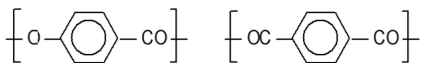
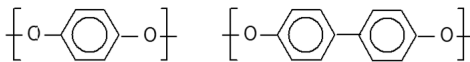


BisphenolA-Polycarbonat (PC)



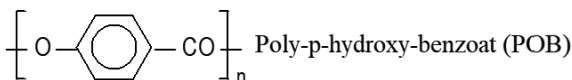
Polyterephthalsäure-
estercarbonat (PEC)

Polyhydroxybenzoate

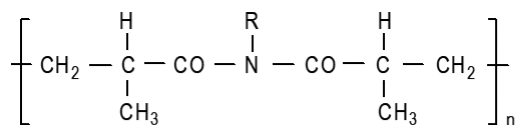


Homo- u. Copolyester von Benzoesäurederivaten mit Strukturelementen unterschiedlichster Anordnung.

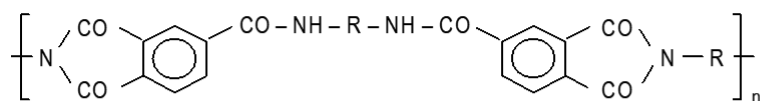
In Verbindung mit aliphatischen Strukturen (Spacer) auch Basis für flüssigkristalline Polymere (LCP).



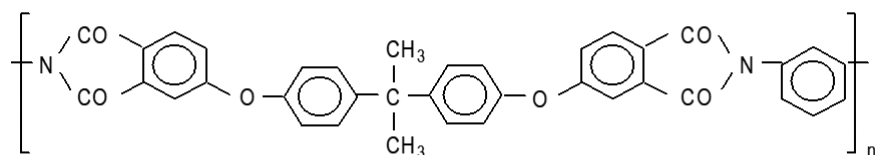
1.2.3.7 Polyimide (PI)



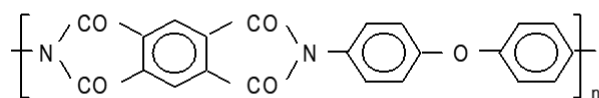
Polymethacrylimid (PMI)



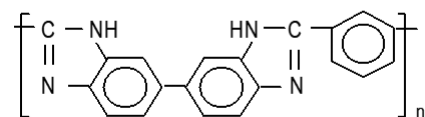
Polyamidimid (PAI)



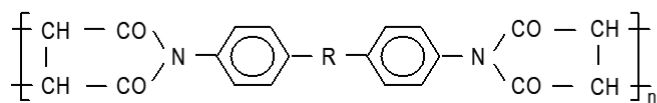
Polyetherimid (PEI)



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	
ABR Acrylester-Butadien-Kautschuk	IIR Butylkautschuk (Isobutylen/Isopren)
ANM Acrylat-Acrylnitril-Kautschuk	IR Isoprenkautschuk (Polyisopren)
BR Butadienkautschuk (Polybutadien)	NR Naturkautschuk (nat. Polyisopren)
CR Chloroprenkautschuk (Polychloropren)	SBR Styrol-Butadien-Kautschuk
CSM Sulfonylchloridkautschuk (Chlorsulfoniertes Polyethylen)	TM Polysulfidkautschuk (Thioplast)
EPDM Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk	TOR Octenamerkautschuk (Polyoctenamer)

R (Rubber) für ungesättigte Kohlenstoffketten

M (Methylen) für gesättigte Kohlenstoffketten

Kurzzeichen für ausgewählte thermoplastische Copolymere	
ABS Acrylnitril-Butadien-Styrol	ETFE Ethylen-Tetrafluorethylen
AMMA Acrylnitril-Methylmethacrylat	MABS Methylmethacrylat-Acrylnitril-Butadien-Styrol
ASA Acrylnitril-Styrol-Acrylester	PA66/6 Copolyamid aus PA66 und PA6
CAB Celluloseacetobutyrat	PA6/12 Copolyamid aus PA6 und PA12
COC Cyclopolyolefin	SB Styrol-Butadien
EVAC Ethylen-Vinylacetat	VCVDC 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 Ordnungserhöhung 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 („Molekülunordnung“) 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 (= Ordnungserhöhung) und durch Erhöhung der Entropie (= Ordnungsverringerung) zu erreichen.

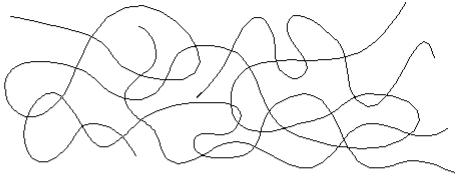
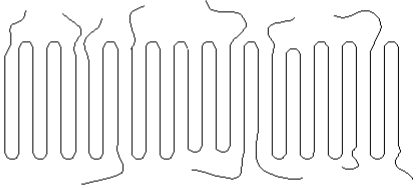

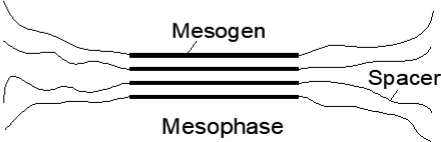
Welche der beiden entgegengesetzt gerichteten Triebkräfte in welchem Ausmaß die Bewegung und den Ordnungsgrad der Moleküle bestimmen, hängt von den äußeren und inneren Bedingungen des Stoffsystems (Molekülgestalt, Molekülmasse und deren Verteilung, Molekohläsion, Temperatur, äußere Krafteinwirkungen, 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 Gesamtmoleküls 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“ mikrobrownsche Molekularbewegung vorausgesetzt, wobei zunächst der **Nahordnungsbereich der Moleküle** betrachtet wird:

Phase	Struktur
amorph	 <p>Knäuel</p>
kristallin	 <p>Lamelle</p>  <p>Mizelle</p>
mesomorph	 <p>Mesogen</p> <p>Spacer</p> <p>Mesophase</p>

Amorph

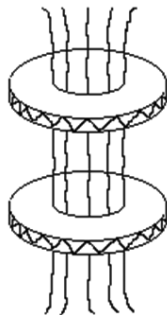
Sind die Moleküle hinreichend beweglich aber durch unregelmäßige Konfiguration nicht optimal für eine enge „Molekülpackung“ geeignet, so wird bei entsprechend tiefer Temperatur der energieärmste Ordnungszustand durch maximale Entropie bestimmt. Es liegt eine amorphe Knäuel- oder Wattebausch-Struktur 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 Parallellagerung und Faltung (Lamellen), während bei sehr steifen Molekülen (z.B. Cellulose) nur eine Parallellagerung möglich ist (Mizellen). Meist aggregieren die Kristallite zu **Überstrukturen**, deren häufigste Vertreter die Sphärolithe sind:



Fibrille



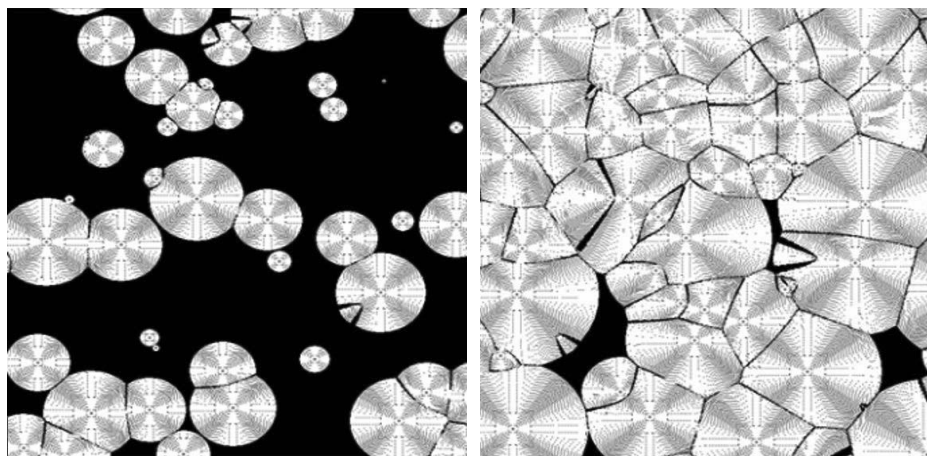
Shish-kebab



Sphärolith

Die Vielfalt der Molekülkonfigurationen sowie die Tendenz der Entropievergrößerung durch Molekülknäuelung 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 Teilvorgänge 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

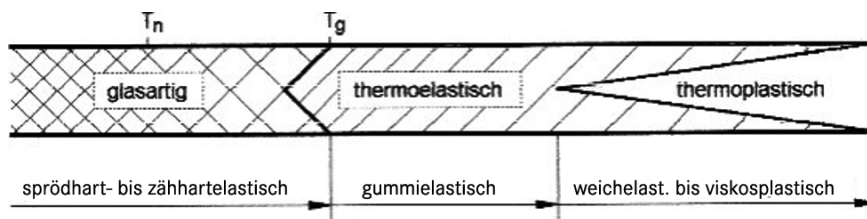
Extrem steife Moleküle (z.B. Leiterpolymere) sind weder zur Bildung einer amorphen Knäuelstruktur noch zur Kristallisation befähigt. Sie verhalten sich wie stabförmige Gebilde (Mesogene), die nur einen sehr geringen Freiheitsgrad der mikrobrownschen Bewegung besitzen. Falls eine makrobrownsche Bewegung 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 plastifizierbar, 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 bestimmbar Zustandsänderungen 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 mikrobrownsche Platzwechsel durch Abnahme der ZMK angeregt, deren „individuelle“ molekulare Wirksamkeit durch die Temperaturlage (T_n) sogenannter Nebeneinfriergebiete (Nebenrelaxationsgebiete) angezeigt werden.

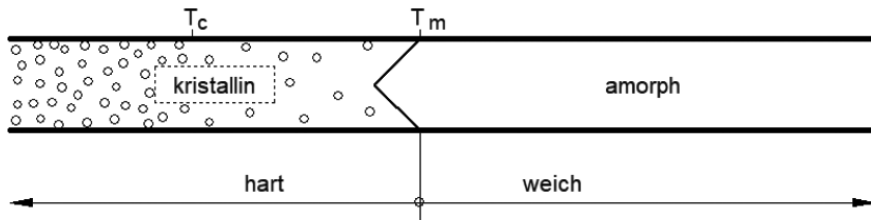
Jenseits der Haupteinfriertemperatur oder Glastemperatur (T_g) ist die mikrobrownsche Molekülbewegung durch das Aufheben aller molekularen Nahordnung freigesetzt, d. h. die ZMK haben ihre unmittelbare Wirksamkeit für die Molekülfixierung verloren.

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



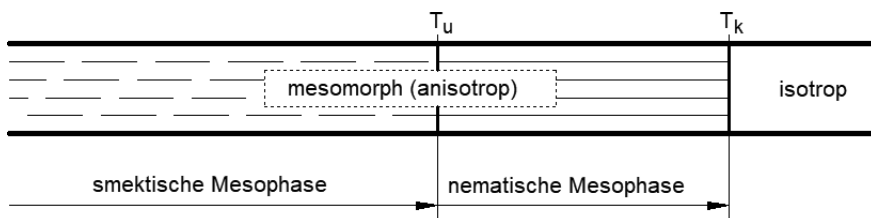
Bei kristallinen Phasen werden nur die Zustände kristallin und amorph durch die Schmelztemperatur (T_m) abgegrenzt, die aus Sicht mechanischer Belastung unterschiedliche Härte bzw. Weichheit bedeuten.

Mit steigender Temperatur können je nach konfigurativen Voraussetzungen im kristallinen Zustand Kristallgitterumwandlungen (T_c) stattfinden, die Nachschwindungseffekte 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 Schmelztemperatur 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 Schmelztemperatur.

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. Mesophasenumwandlungen 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 mikrobrownschen 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



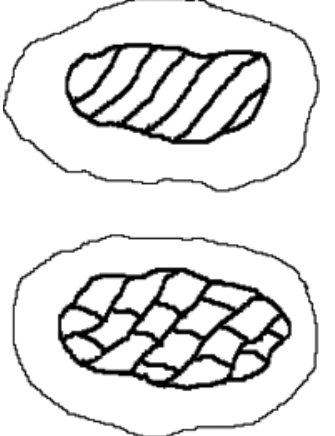
1.3.4.1 Chemische Vernetzungsstruktur

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 rückbildbar.

1.3.4.2 Physikalische Vernetzungsstruktur

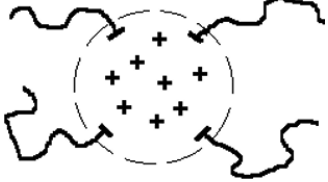

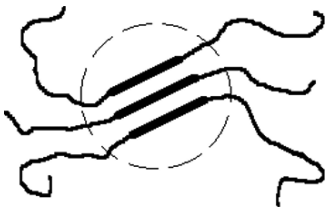
Physikalische Vernetzungsstellen werden bei Temperaturerhöhung aufgehoben und bei Abkühlung zurückgebildet, wodurch thermoplastische Verarbeitung ermöglicht wird. Ihre Zusammenhaltkräfte sind deutlich geringer als bei chemischer Vernetzung. Dies ist im Zusammenhang mit mechanischer Beanspruchung von 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	
	<p>Amorphe Thermoplaste ($T_g < T_r$), deren Molekülverschlaufungen (engl.: entanglements), insbesondere bei sehr hochmolekularen Typen, als temporäre und fluktuierende Vernetzungsstellen wirken.</p> <p>z. B. PIB, PE-C, PVC-P</p>
	<p>Teilkristalline Thermoplaste ($T_g < T_r$) mit sehr geringem Kristallisationsgrad, deren kristalline Bereiche als Vernetzungsstellen wirken.</p> <p>z. B. PE-VLD</p>
	<p>Blends aus Thermoplasten als kohärente Phase (Matrix) mit unvernetzten oder vernetzten Elastomeren als fein-disperse Phase, wobei die Matrix als „Netzwerkgerüst“ wirkt. Verbesserung der Phasenkopplung durch Kompatibilisatoren (z. B. Pfropfcopolymere) ist üblich.</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ unvernetzte Phase: z. B. (EPDM+PP), (NR+PP) ▪ vernetzte Phase: z. B. (EPDM-X+PP), (NR-X+PP)

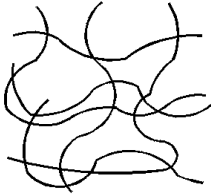
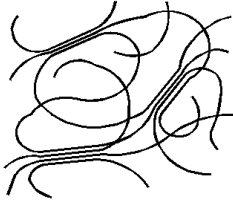
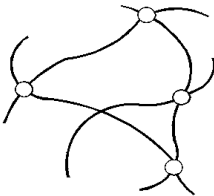
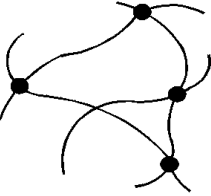
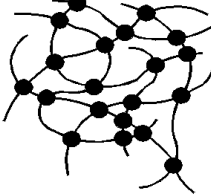
T_g Glas temperatur

T_r Raumtemperatur (z. B. 23 °C)

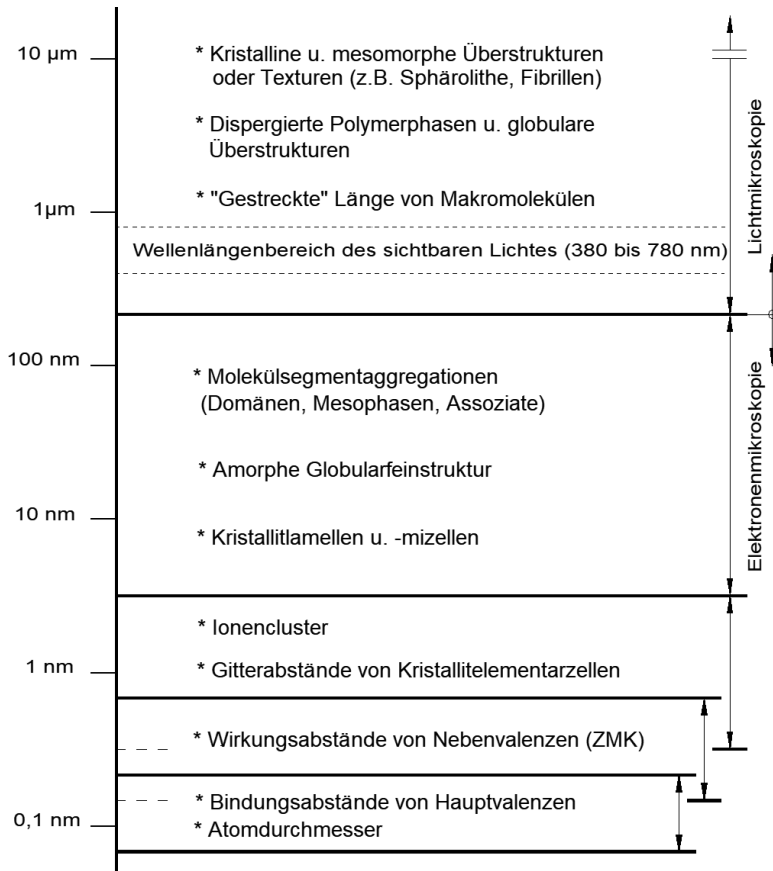
Physikalische Vernetzungsstrukturen bei thermoplastischen Elastomeren	
	Thermoplaste ($T_g < T_r$) mit partiellen Ionenbindungen, die als aggregierte Ionencluster wie Vernetzungsstellen wirken (Ionomere)
	Amorphe Teleblockcopolymere (Triblockpolymere) mit langkettigem Weichsegmentmittelblock ($T_g < T_r$) 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 Glasstemperatur 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
		<p>● chemische Vernetzungsstellen aus Atombindungen</p> <p>○ physikalische Vernetzungsstellen aus Hartdomänen unverträglicher (entmischter) Molekülteile von Copolymeren, aus Kristallitclustern oder Ionenclustern</p>
Gummi (vulkan. Kautschuk) weitmaschig vernetzt	Duroplaste engmaschig vernetzt	

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. makrobrownsche 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 δ möglich, wenn seine Geltungsgrenzen beachtet werden:

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

ΔH_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 Dateien 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 μ geeignet. Für völlig unpolare Medien gilt $\mu = 0$. Für polares Wasser ist $\mu = 1,84 D$.

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.).



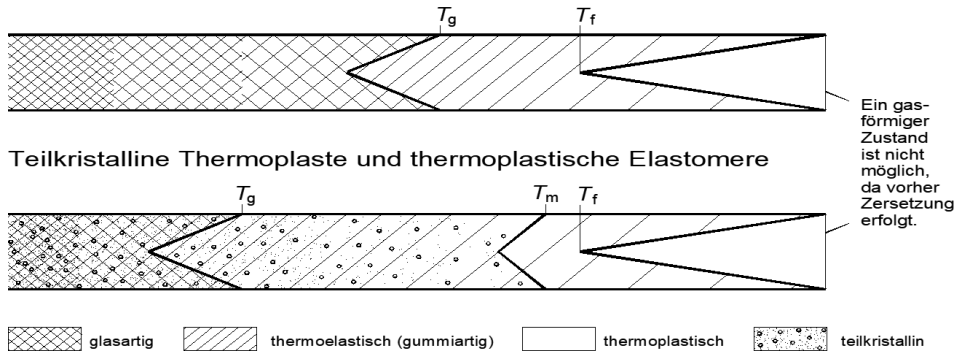
Eine weitere Anwendung für Treibmittel auf FCKW-Basis wurde vom Autor zu einem patentierten Verfahren für das Verschäumen eines neu entwickelten Aceton-Formaldehyd-Schaumstoffes geführt (DKK Scharfenstein, 1966).

■ 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 Eigenschaften.

Amorphe Thermoplaste und thermoplastische Elastomere



T_g : Glasübergangstemperatur

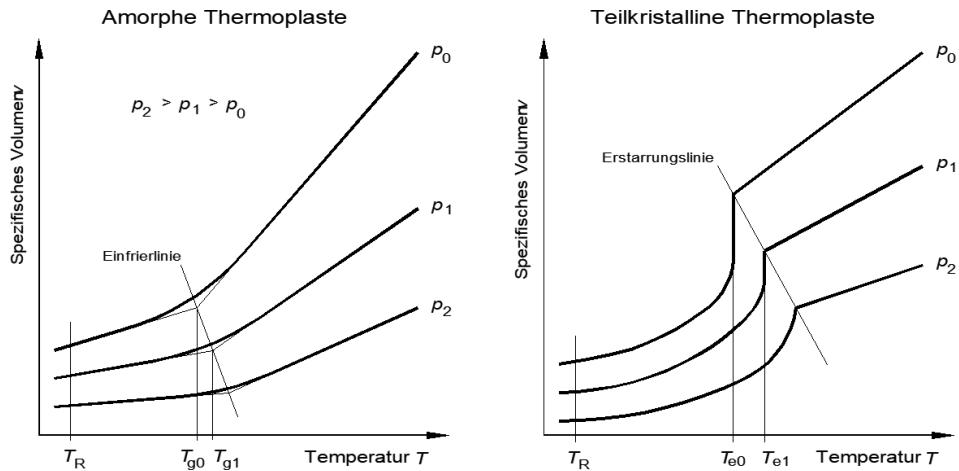
T_m : Schmelztemperatur

T_f : Fließtemperatur

Duroplaste sind immer amorph und haben je nach Vernetzungsgrad eine hohe Glasübergangstemperatur mit sehr wenig ausgeprägtem thermoelastischen Bereich. Thermoplastizität 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. Verarbeitungsschwindigkeit 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 α nach ISO 11359-2.

Mechanische und dilatometrische Eigenschaften ungefüllter und unverstärkter Polymere				
Härtegrad	E [N/mm ²]	Shorehärte A; D	α [$10^{-5} \times K^{-1}$]	Polymere
hart	> 1200 ... 5000	> 75D	12 ... 7	Zähnharte bis sprödharte Thermoplaste, Duroplaste, Hartgummi
halbhart	> 300 ... 1200	>60D ... 75D	17 ... 12	Weichelastische Thermoplaste, thermoplastische Elastomere und Gummi unterschiedlicher Härte
	> 30 ... 300	>35D ... 60D	26 ... 17	
weich	3 ... 30	50 A ... 90 A	35 ... 26	
sehr weich	< 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 Parallellagerung der Makromoleküle (= Molekülorientierung), die eine Eigenschaftsanisotropie zur Folge hat. Beim Recken teilkristalliner Thermoplaste können infolge Umlagerung bzw. Neubildung orientierte kristalline Strukturen (z. B. Fibrillen, 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 Parallellagerung 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-brownsche Beweglichkeit	Makro-brownsche Beweglichkeit
energie-elastisch (auch: spontan-elastisch, stahl-elastisch)	Konfigurationsänderung ohne molekulare Platzwechsel	Spontane Verformung	spontane Rückverformung (reversibel)	glasartig	minimal	minimal
entropie-elastisch (auch: gummi-elastisch)	Mikro-brownsche Konformationsänderung	Zeitverzögerte Verformung	zeitverzögerte Rückverformung (reversibel)	thermo-elastisch	maximal	minimal
plastisch (auch: viskos)	Makro-brownsche 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 ³	0,8 ... 2,2	7,85
Wärmeleitzahl W/m K	0,15 ... 0,5	50
Elektrische Leitfähigkeit S/m	10 ⁻¹¹ ... 10 ⁻¹⁶	10 ⁷
E-Modul N/mm ²	3 ... 5000 LCP: 5000 ... 20 000	210 000
Wärmedehnzahl 10 ⁻⁵ × K ⁻¹	7 ... 35 (ohne LCP)	1,2
Brennbarkeit	Von leicht entflammbar mit großer Abbrandgeschwindigkeit Bis 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, zellulärer oder kapillarer Strukturen
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Monomere, Vernetzungsmittel ▪ Härter bzw. Aktivatoren (Katalysatoren) ▪ Beschleuniger ▪ Verzögerer (Inhibitoren) ▪ Strukturregler 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Keimbildner (Nukleierungsmittel) ▪ Treibmittel, Kicker ▪ Porenregler ▪ Kapillarbildner ▪ Feuchtigkeitsabsorber ▪ Haftvermittler (Compatibilizer)

Erzielung gewünschter Verarbeitungs- und Anwendungseigenschaften
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Weichmacher, Flexibilisatoren ▪ Verdünner, Extender, Thixotropiermittel, Antisedimentationsmittel ▪ Flammenschutzmittel, Rauchminderer ▪ Farbmittel (Farbstoffe, Farbpigmente), Aufheller, Mattierungsmittel ▪ Lichtschutzmittel (UV-Absorber, Quencher, Radikalfänger) ▪ Wärme- und Hydrolysestabilisatoren, Antioxidantien, Alterungsschutzmittel, Metall-desaktivatoren ▪ Antiradantien ▪ Gleit-, Trenn-, Antiblock- und Anticakingmittel ▪ Antistatika, Leitfähigkeitszusätze (Wärme, Elektrizität), Dotierungsmittel, Magnetisierungszusätze ▪ Geruchsverbesserer, Fungizide, Biostabilisatoren

Chemische Modifizierung der Polymerstruktur

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

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"> ▪ Kurzfaser: > 10 ▪ Langfaser: > 1000 ▪ Endlosfaser: ∞ 	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 unwesentlich 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 ³]	Wärmeleitzahl [W/mK]
Kohlenstoffmodifikationen (Ruß, Graphit, 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 (BaSO_4), Lithopone, Magnesiumoxid, Aluminium, Kupfer, Bleibronze, Aluminiumhydroxid ($\text{Al}(\text{OH})_3$)
über 4 ... 6	Blauasbest (Krokydolith), Zinkoxid, Zinkspat (ZnCO_3), Titandioxid (Anatas, Rutil), Magnesit (MgCO_3), Wollastonit, Bariumferrit, Eisen, Magnetit (Fe_3O_4), Hochdisperse Kieselsäure (Aerosil)
über 6	Glas, Quarzgut, Quarz und quarzhaltige Gesteinsmehle, Zirkonsilikat Hinweis: 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 [N/mm^2]
Carbonfaser (HT)	230 000
E-Glasfaser	73 000
Aramidfaser verstreckt (NH)	60 000
Leichtminerale (Dichte unter 3 g/cm^3)	ca. 90 000
Schwerminerale (Dichte über 4 g/cm^3)	ca. 130 000
Cellulose- und Naturfaser	ca. 20 000
Holzmehl	ca. 10 000

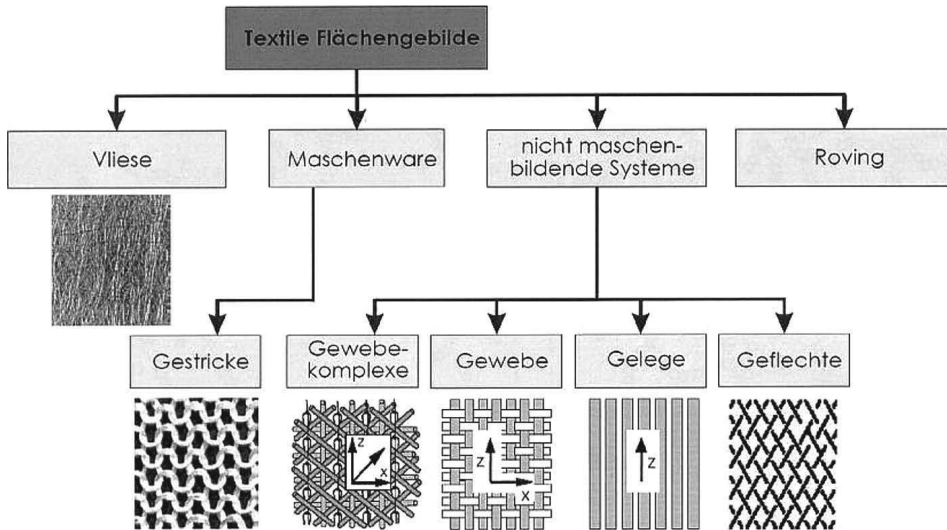
Optimaler Füllungsgrad der Polymere

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 angebar, 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 kg/m^3 bis 20 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 Gewichtsersparnis 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 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 (CO_2 oder N_2) im überkritischen Zustand ($\text{SCF} = \text{Super Critical Fluid}$) 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 mikrozellulärer 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 (Glastemperatur 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 Selbstverlösch 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. Arylpolymere, 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. Bezüglich 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 Anwendungseigenschaf-

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, Brennbarkeitsminderung. 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 dynamischer 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
Ähnlichkeitskennzahlen 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 Copolymere 18
Ausschussabschätzung 258
Ausschuss- und Qualitätssicherungskosten 271
Äußere Weichmachung 43
Auswahl der Verarbeitungsparameter 308

B

Basisdaten 257
Basisdaten für Kunststoffe 322
Basisgeometrielemente 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
Beständigkeitskriterien 53
Beständigkeitskriterien 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 Druck-
 beanspruchung **187**
 Beulen isotroper Platten durch konstante
 Randdruckspannungen **171**
 Beulen oder Drillknicken dünnwandiger
 Hohlzylinder durch Torsionsbeanspruchung
 174
 Beulen oder Knicken dünnwandiger Hohl-
 zylinder durch Axialdruckbeanspruchung
 und/oder Biegebeanspruchung **176**
 Beulen oder Knicken dünnwandiger Hohl-
 zylinder 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 Kegelschalen **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**
 Biegedrillknicken **154**
 Biegeschnappverbindungen einschließlich
 segmentierter Zylinderschnapp-
 verbindungen **347**
 Biot-Zahl **202**
 Blendstrategie **246**
 Brennbarkeit **99**

C

Cellulosederivate **13**
 Chemische Vernetzungsstruktur **26**
 Copolymere **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
Biegefedern 351
Funktionsnachweis für gerade Biegefedern
349

G

Geometrielemente 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
Körperformparameter 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
- Massetemperatur 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 Ordnungs-
strukturen 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 Werkstoff-
komponenten 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
Randeinspannung 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

Sandrauigkeitswert 212
Sauerstoffindex 99
Schaumstoffe 41

Scheitelbeulen 154
Scheitelknicken biegebeanspruchter Träger
mit Hohlzylinderquerschnitt 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
Spannungsrissebildung 84
Spezialtypen durch Werkstoffmodifizierung
54
Spezifischer Durchgangswiderstand 104
Spritzlinggeometrie 294
Stabilitätsnachweis 357
Stabilitätsnachweise 408
Stabilitätsnachweise für Stützkernverbund-
bauteile 188
Steifigkeitserhöhung durch Füll- und
Verstärkungstoffe 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
Verarbeitungsschwindigkeit 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 strukturvisko-
se Medien 228
Vorauswahl 50

W

Wärmealterungsbeständigkeit 65
Wärmedehnung 77
Wärmedurchgang 193
Wärmeeindringzahl 109
Wärmeformbeständigkeit 65, 78, 137
Wärmekapazität 109
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 Kunst-
stoffrecycling 243
Werkzeugbedarf und Maschinenbelegungszeit
273
Werkzeugkonturtemperatur bei Einspritzbe-
ginn 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
- Zeitverlaufsarten 132
- Zulässige Dehnung 140
- Zulässige Spannungen 141
- Zulässige Stauchung 141
- Zusatzstoffdatei 290
- Zwischenmolekulare Kräfte (ZMK) 9
- Zykluszeit 281
- Zykluszeitberechnung 315
- zylindrische Pressverbindung 397