

HANSER



Leseprobe

Christian Bonten

Kunststofftechnik

Einführung und Grundlagen

ISBN (Buch): 978-3-446-44674-8

ISBN (E-Book): 978-3-446-44917-6

Weitere Informationen oder Bestellungen unter

<http://www.hanser-fachbuch.de/978-3-446-44674-8>

sowie im Buchhandel.



Bleiben Sie auf dem Laufenden!

Hanser Newsletter informieren Sie regelmäßig über neue Bücher und Termine aus den verschiedenen Bereichen der Technik. Profitieren Sie auch von Gewinnspielen und exklusiven Leseproben. Gleich anmelden unter

www.hanser-fachbuch.de/newsletter

Die Internet-Plattform für Entscheider!

Exklusiv: Das Online-Archiv der Zeitschrift Kunststoffe!

Richtungsweisend: Fach- und Brancheninformationen
stets top-aktuell!

Informativ: News, wichtige Termine, Bookshop, neue
Produkte und der Stellenmarkt der Kunststoffindustrie

Kunststoffe.de

Christian Bonten

Kunststofftechnik

Einführung und Grundlagen

2., aktualisierte Auflage

HANSER

Der Autor:

Prof. Christian Bonten,
Universität Stuttgart, Institut für Kunststofftechnik (IKT),
Pfaffenwaldring 32, 70569 Stuttgart

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <<http://dnb.ddb.de>> abrufbar.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutzgesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Alle in diesem Buch enthaltenen Verfahren bzw. Daten wurden nach bestem Wissen dargestellt. Dennoch sind Fehler nicht ganz auszuschließen. Aus diesem Grund sind die in diesem Buch enthaltenen Darstellungen und Daten mit keiner Verpflichtung oder Garantie irgendeiner Art verbunden. Autoren und Verlag übernehmen infolgedessen keine Verantwortung und werden keine daraus folgende oder sonstige Haftung übernehmen, die auf irgendeine Art aus der Benutzung dieser Darstellungen oder Daten oder Teilen davon entsteht.

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdruckes und der Vervielfältigung des Buches oder Teilen daraus, vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Einwilligung des Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder einem anderen Verfahren), auch nicht für Zwecke der Unterrichtsgestaltung – mit Ausnahme der in den §§ 53, 54 URG genannten Sonderfälle –, reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

© 2016 Carl Hanser Verlag München

www.hanser-fachbuch.de

Herstellung: Kösel Media GmbH, Krugzell

Coverconcept: Marc Müller-Bremer, www.rebranding.de, München

Coverrealisierung: Stephan Rönigk

Satz, Druck und Bindung: Kösel, Krugzell

Printed in Germany

ISBN: 978-3-446-44674-8

E-Book-ISBN: 978-3-446-44917-6

Vorwort

■ Vorwort zur 2. Auflage

Ein wenig überrascht war ich, als der Verlag bereits anderthalb Jahre nach Verkaufsstart um die Vorbereitung einer Neuauflage bat. Die vielen beim Verlag eingegangenen Rezensionen waren fast ausnahmslos positiv, enthielten wertvolle Vorschläge und bestärkten mich darin, dieses Buch auf diese Art weiterzuführen. Zuletzt wählten 604 Studierende die diesem Buch in Struktur und Inhalt zugrundeliegende Vorlesung und bekräftigen mich ebenfalls, weiter auf diese Weise zu unterrichten. Bei der zweiten Auflage konzentriere ich mich nun auf einzelne Ergänzungen, Überarbeitungen und Aktualisierungen sowie die Korrektur einzelner Fehler.

Stuttgart, im September 2016

■ Vorwort zur 1. Auflage

Direkt nach meinem Dienstantritt am Institut für Kunststofftechnik in Stuttgart im Spätsommer 2010, überarbeitete ich gleich mit Hilfe der mir anvertrauten wissenschaftlichen Mitarbeiter die Vorlesung „Grundlagen der Kunststofftechnik“. Diese wichtige Vorlesung wurde bereits seit langer Zeit unverändert in Stuttgart gehalten. Wir aktualisierten bei der Überarbeitung nicht nur Bilder und Inhalte, sondern gaben der Vorlesung eine neue Struktur, die ich – inspiriert durch didaktische Seminare des Deutschen Hochschulverbands – für zeitgemäßer halte. Zahlreiche in den Vorlesungen genutzte Filmsequenzen ermöglichen den Studenten, die Inhalte schneller zu verstehen. Ich bin mir sicher, die Studenten für das bevorstehende Berufsleben mit umfassendem grundlegendem Kunststoffwissen auszustatten. Wer das Fach vertiefen möchte, kann dies jeweils in den drei Hauptgebieten „Werkstofftechnik“, „Verarbeitungstechnik“ und „Produktentwicklung“ tun.

Diese einführende und grundlegende Vorlesung bedient als sogenanntes Wahlfach mit vier Unterrichtsstunden pro Woche Masterstudenten der Verfahrenstechnik, des Maschinenbaus (u.ä. wie Produktionstechnik, Kraftfahrzeugtechnik), der Materialwissenschaften und des Technologiemanagements. Die Vorlesung ist eigentlich auf technisch vorgebildete Studenten ausgerichtet, dennoch wählen sie inzwischen auch nichttechnische Studenten. Während nach dem Wintersemester 2010 etwa 100 Studenten dieses Fach prüfen ließen, wurden es nach den Wintersemestern 2011, 2012 und 2013 jeweils etwa 100 Studenten mehr. Die wachsende Menge höchst interessierter und disziplinierter Masterstudenten verleitete mich dazu, die Bilder mit Fließtext zu ergänzen und in Buchform herauszugeben.

Studenten des Winters 2012/13 sprachen mich auf die kritischen Themen an, die man „in den Medien so hört“. Ich beschloss daraufhin, den Themen „Umweltverschmutzung“, „Gift in Kunststoffen“ und „Biokunststoffe“ bis hin zur Urquelle auf den Grund zu gehen und dies ebenfalls als Vorlesungsteil aufzubereiten. Diese Themen bilden in diesem Buch das Abschlusskapitel und ich habe den Eindruck, dass sachliche Information das beste Mittel zur Aufklärung ist. Der Leser möge entscheiden, ob mir ein sachlicher Umgang mit den Themen gelungen ist.

Ich danke dem Verlag herzlich, dieses Buch in Farbe und mit Hardcover für einen Preis anzubieten, der es für Studenten noch erschwinglich macht. Auch danke ich den unterstützenden Mitarbeitern (s. u.), denn ohne sie wäre das Buch nicht „rund“ geworden. Jeder wissenschaftliche Mitarbeiter hat mindestens ein Unterkapitel aufmerksam durchgearbeitet und wertvolle Hinweise auf Fehler und zur Verständlichkeit des Textes gegeben. Technische Mitarbeiter haben mich mit Bildern aus ihrem Arbeitsalltag unterstützt. Besonders hervorheben möchte ich die Herren Dipl.-Ing. Stefan Epple (Gesamtkoordination), Dipl.-Wirt.-Ing. Oliver Kast („roter Faden“ und Schlagworte), M. Eng. Tristan Koslowski und Manuel Hodrius (Bilder) sowie Dipl.-Phys. Nikolai Gulnizkij (Filme).

Ich bin sicher, jedem Leser/Studenten mit dem Wissen des Buches die Möglichkeit zu geben, schnell in der Kunststoffbranche Fuß zu fassen und ihn früh zur Entscheidung zu befähigen, in welcher Anwendung Kunststoffe Großartiges leisten.

Stuttgart, im Mai 2014

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Christian Bonten

Inhalt

Vorwort	V
Vorwort zur 2. Auflage	V
Vorwort zur 1. Auflage	V
Der Autor: Prof. Christian Bonten	IX
Hinweise zur Benutzung des Buches	XI
1 Einleitung	1
1.1 Kunststoff – Werkstoff der Moderne	1
1.2 Einsatzgebiete von Kunststoffen	5
1.3 Kunststoffe und Design	8
1.4 Literaturverzeichnis	11
2 Grundlagen	13
2.1 Von Monomer zu Polymer – Grundlagen der Polymerchemie	13
2.1.1 Herkunft der Monomere	13
2.1.2 Polymersynthese	16
2.1.2.1 Polymerisation	16
2.1.2.2 Copolymerisation (Sonderform der Polymerisation)	19
2.1.2.3 Polykondensation	20
2.1.2.4 Polyaddition	21
2.1.3 Die Molmasse von Polymeren	22
2.1.4 Bindungskräfte und Brown'sche Molekularbewegung	28
2.1.4.1 Inermolekulare chemische Bindungen	28
2.1.4.2 Intermolekulare physikalische Bindungen	30
2.1.4.3 Brown'sche Molekularbewegung – Beweglichkeit der Polymerketten	34
2.1.5 Mechanismen der Erstarrung und Unterteilung der Polymere	35

2.1.6	Primärstruktur von Polymeren: Konstitution und Konfiguration	38
2.1.7	Sekundär- und Tertiärstrukturen von Polymeren: Konformation	40
2.1.7.1	Amorphe Strukturen	41
2.1.7.2	Kristalline Strukturen	42
2.1.7.3	Einfluss der Primärstruktur	43
2.1.7.4	Überstrukturen	46
2.1.8	Polymere – Rohstoff nicht nur für Kunststoffe	49
2.2	Grundlagen der Kraftübertragung	50
2.2.1	Wichtige Begriffe	51
2.2.1.1	Festigkeit	51
2.2.1.2	Steifigkeit	51
2.2.1.3	Zähigkeit	51
2.2.1.4	Spannungs-Dehnungs-Diagramme	52
2.2.2	Zustandsbereiche von Kunststoffen	55
2.2.2.1	Glasübergangstemperatur T_g	55
2.2.2.2	Kristallitschmelztemperatur T_m	56
2.2.2.3	Zustandsbereiche vernetzter Polymere	57
2.2.3	Mechanische Ersatzmodelle	59
2.3	Kunststoff und Kunststofftechnik – Begriffsbestimmung	63
2.4	Literaturverzeichnis	65
3	Kunststoff-Werkstofftechnik	69
3.1	Verhalten in der Schmelze – Fließeigenschaften und deren Messung ..	70
3.1.1	Strömungsmechanische Grundlagen	71
3.1.2	Einflüsse auf das Fließverhalten	78
3.1.3	Das Konzept der repräsentativen Viskosität	84
3.1.4	Dehnung von Schmelze	86
3.1.5	Strangaufweitung und Schrumpf	89
3.1.6	Rheometrie – die Messung der Fließeigenschaften	91
3.1.6.1	Die Messung des Schmelzemassefließrate MFR	92
3.1.6.2	Das Hochdruck-Kapillarrheometer	93
3.1.6.3	Rotationsrheometer	95
3.1.6.4	Dehnrrheometer	100
3.2	Verhalten als Festkörper – Festkörpereigenschaften und deren Messung	101
3.2.1	Mechanische Eigenschaften von Kunststoffen	102
3.2.1.1	Der Zugversuch	102
3.2.1.2	Der Schnellzerreißversuch	105
3.2.1.3	Zeit- und Temperatureinfluss auf das mechanische Verhalten	107

3.2.1.4	Der Zeitstandversuch	110
3.2.1.5	Der Schwingversuch	111
3.2.1.6	Der Biegeversuch	114
3.2.2	Physikalische Eigenschaften	117
3.2.2.1	Elektrische Eigenschaften	117
3.2.2.2	Magnetische Eigenschaften	119
3.2.2.3	Optische Eigenschaften	120
3.2.2.4	Akustische Eigenschaften	128
3.2.3	Werte für den Wärme- und Stoffaustausch	130
3.2.3.1	Spezifische Enthalpie h	130
3.2.3.2	Spezifische Wärmekapazität c_p	132
3.2.3.3	Dichte ρ	135
3.2.3.4	Wärmeleitfähigkeit λ	136
3.2.3.5	Wärmeausdehnungskoeffizient α	139
3.2.3.6	Temperaturleitfähigkeit a	140
3.2.3.7	Wärmeeindringzahl b	142
3.2.3.8	Stofftransport	142
3.3	Beeinflussung der Eigenschaften durch Zusatzstoffe	147
3.3.1	Verstärkungsstoffe – Aktive Zusatzstoffe	147
3.3.1.1	Die Fasern und das Prinzip der Verstärkung	151
3.3.1.2	Die Aufgaben der Matrix	154
3.3.1.3	Kraftübertragung des Faserkunststoffverbunds	155
3.3.1.4	Defekte in Faserkunststoffverbunden	159
3.3.1.5	Nanopartikel als aktive Zusatzstoffe	163
3.3.2	Funktions-Zusatzstoffe – Additive	165
3.3.2.1	Viskositätsverändernde Zusatzstoffe – Fließhilfsmittel	165
3.3.2.2	Weichmacher	166
3.3.2.3	Zumischung anderer Polymere – Bildung von Polymerblends	168
3.3.2.4	Schlagzähmodifizierer	168
3.3.2.5	Keimbildner (Nukleierungsmittel)	170
3.3.2.6	Haftvermittler	171
3.3.2.7	Leitfähige Zusatzstoffe	172
3.3.3	Füllstoffe – Inaktive Zusatzstoffe	173
3.4	Von Polymer zu Kunststoff – Einführung in die Kunststoff-Aufbereitung	174
3.4.1	Der Doppelschneckenextruder	175
3.4.2	Verfahrenstechnik	176
3.4.3	Charakteristische Kennwerte	180
3.4.4	Zusatzaggregate	181

3.5 Prozess, Struktur, Eigenschaften – Beeinflussung im Verarbeitungsprozess	184
3.5.1 Eigenspannungen	185
3.5.2 Orientierung von Makromolekülen	186
3.5.3 Orientierung von Fasern	189
3.5.4 Kristallisation	190
3.5.5 Bildung einer Makrostruktur: Schäumen von Kunststoffen	190
3.6 Veränderungen mit der Zeit – Einblick in die Alterung von Kunststoffen	192
3.6.1 Alterungursachen	193
3.6.2 Alterungsvorgänge	194
3.6.2.1 Mechanische Alterungsmechanismen	194
3.6.2.2 Physikalische Alterungsmechanismen	195
3.6.2.3 Chemische Alterungsmechanismen	197
3.6.2.4 Wirkweise von Alterungsstabilisatoren	199
3.6.3 Alterungerscheinungen	200
3.6.4 Charakterisierung des Alterungsfortschritts	201
3.7 Kurzdarstellung einiger wichtiger Kunststoffe	204
3.8 Polyethylen (PE)	208
3.9 Polypropylen (PP)	209
3.10 Ethylen-Propylen-(Dien)-Copolymere (EPDM)	210
3.11 Polyvinylchlorid (PVC)	213
3.12 Polystyrol (PS)	215
3.13 Styrol-Butadien-Styrol-Copolymere (SBS)	217
3.14 Styrol-Acrylnitril-Copolymere (SAN)	218
3.15 Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymere (ABS)	221
3.16 Acrylnitril-Styrol-Acrylester-Copolymere (ASA)	222
3.17 Polyamid (PA)	225
3.18 Polybutylenterephthalat (PBT)	231
3.19 Polyethylenterephthalat (PET)	232
3.20 Polycarbonat (PC)	235
3.21 Polymethylmethacrylat (PMMA)	237
3.22 Polyoxymethylen (POM)	239
3.23 Polytetrafluorethylen (PTFE)	242
3.24 Polyetheretherketon (PEEK)	243
3.25 Polyethersulfon (PES) und Polysulfon (PSU)	245

3.26 Polyphenylensulfid (PPS)	247
3.27 Cellulosederivate	249
3.28 Polyhydroxyalkanoate (PHA)	251
3.29 Polylactid (PLA)	252
3.30 Thermoplastisches Polyurethan (TPE-U, auch TPU)	254
3.31 Polyurethan (PUR)	255
3.32 Epoxidharze (EP)	256
3.33 Melaminformaldehydharz (MF)	258
3.34 Phenol-Formaldehyd- oder Phenolharz (PF)	259
3.35 Harnstoff-Formaldehydharz (UF)	260
3.36 Ungesättigtes Polyesterharz (UP)	261
3.37 Literaturverzeichnis	262
4 Kunststoff-Verarbeitungstechnik	265
4.1 Extrusion	266
4.1.1 Extruderschnecke und Zylinder	267
4.1.2 Der Hochleistungsextruder Helibar®	275
4.1.3 Rohr- und Profilextrusion	277
4.1.4 Flachfolien- und Plattenextrusion	283
4.1.5 Schlauch- und Blasfolienextrusion	284
4.1.6 Extrusions-Blasformen	286
4.1.7 Co-Extrusion	287
4.2 Spritzgießen	289
4.2.1 Der Spritzgießprozess	292
4.2.2 Das Plastifizieraggregat	295
4.2.3 Die Schließeinheit mit Spritzgießwerkzeug	297
4.2.3.1 Rheologische Auslegung	300
4.2.3.2 Thermische Auslegung	302
4.2.4 Einfluss des Spritzgießprozesses auf die Eigenschaften des Bauteils	305
4.2.5 Vorstellung einiger Sonderverfahren	308
4.2.5.1 Spritzprägen	309
4.2.5.2 Thermoplastschaum-Spritzgießen	310
4.2.5.3 Kaskaden-Spritzgießen	311
4.2.5.4 Spritzgießcompoundieren	312
4.2.5.5 Mehr-Komponenten-Verfahren	313
4.2.5.6 Sandwich-Spritzgießen	315
4.2.5.7 Fluidinjektionstechniken	317

4.2.5.8 Hinterspritztechnik	318
4.2.5.9 Spritzstreck-Blasformen	320
4.2.5.10 Variotherme Werkzeugtemperierung	321
4.3 Verarbeitung von vernetzenden Kunststoffen	323
4.3.1 Pressen	325
4.3.2 Transferpressen	326
4.3.3 Spritzgießen	327
4.3.4 Verarbeitung von Polyurethan	328
4.4 Technologie der Faserkunststoffverbunde	333
4.4.1 Handlaminieren und Faserspritzen	334
4.4.2 Pressen von SMC und GMT	335
4.4.3 Pultrusion von Endlosfasern	338
4.4.4 Arbeiten mit Prepregs	340
4.4.5 Harzinjektionsverfahren	341
4.4.6 Dreidimensionale Faserkunststoffverbundstrukturen	343
4.5 Weiterverarbeitung	345
4.5.1 Thermoformen	345
4.5.2 Mechanische Bearbeitung von Kunststoffen	352
4.5.3 Schweißen	356
4.5.3.1 Heizelementschweißen	358
4.5.3.2 Ultraschallschweißen	362
4.5.3.3 Vibrationsreibschweißen	364
4.5.3.4 Laserschweißen	365
4.5.4 Kleben	366
4.5.5 Fügen durch Schnappverbindungen, Schrauben und Nieten	371
4.5.6 Beschichten von Kunststoffen	374
4.5.6.1 Beschichtete Bauteile	375
4.5.6.2 Beschichtungsverfahren	378
4.6 Literaturverzeichnis	382
5 Produktentwicklung mit Kunststoffen	385
5.1 Kunststoffe als Konstruktionswerkstoffe	386
5.1.1 Kunststoffspezifische Alleinstellungsmerkmale	386
5.1.2 Werkstoffvorauswahl	390
5.2 Geometrische Unterteilung von Produkten	392
5.2.1 Großflächige Produkte	392
5.2.2 Gehäuseartige Produkte	393
5.2.3 Behälterartige Produkte	394
5.2.4 Komplexe Produkte	394
5.2.5 Funktionsspezifische Produkte	395
5.2.6 Bedeutung für die Wahl des Verarbeitungsverfahrens	395

5.3 Konstruieren mit Kunststoffen	397
5.3.1 Anforderungen an Produkte und Funktionen	398
5.3.2 Nutzen der Gestaltungsfreiheit – Integration von Funktionselementen	401
5.3.3 Nutzung der Gestaltungsfreiheit – Erhöhung des Flächenträgheitsmoments	405
5.3.4 Werkstoffgerechtes Konstruieren	409
5.3.5 Fertigungsgerechtes Konstruieren	420
5.3.6 Beanspruchungsgerechtes Konstruieren	423
5.3.6.1 Dimensionierung gegen eine zulässige Spannung	426
5.3.6.2 Dimensionierung gegen eine kritische Dehnung	428
5.3.6.3 Dimensionierung gegen den Zeiteinfluss – Lebensdauervorhersage	431
5.3.7 Kurzzusammenfassung der kunststoffgerechten Konstruktion	434
5.4 Nutzen von Prototypen in der Produktentwicklung	436
5.4.1 Rapid Prototyping	436
5.4.1.1 Stereolithographie (SLA)	437
5.4.1.2 Selektives Lasersintern (SLS)	439
5.4.1.3 Laminated Object Manufacturing (LOM)	439
5.4.1.4 3-D-Printing (3-D-P)	440
5.4.1.5 Strangablegeverfahren (FDM oder FFF)	441
5.4.2 Rapid Tooling	443
5.4.2.1 Gießverfahren	444
5.4.2.2 Lasersintern	447
5.4.3 Wahl eines Prototypverfahrens	448
5.4.3.1 Anforderungen an den Prototyp	448
5.4.3.2 Prototypen für großflächige Produkte und für gehäuseartige Produkte	449
5.4.3.3 Prototypen für behälterartige Produkte	451
5.4.3.4 Prototypen für komplexe Produkte	452
5.5 Literaturverzeichnis	453
6 Kunststoffe und Umwelt	455
6.1 Kunststoffabfälle	455
6.2 Sind Kunststoffe giftig?	460
6.3 Biopolymere und Biokunststoffe	465
6.3.1 Bioabbaubare Kunststoffe	466
6.3.2 Biobasierte Kunststoffe	471
6.3.3 Von Biopolymer zu Biokunststoff – Aufbereitung von Biopolymeren	476

6.4	Ressourcenschonung mit Kunststoffen	478
6.4.1	Herkunft des Begriffes der „Nachhaltigkeit“	478
6.4.2	Der Brundtland-Bericht und das Kyoto-Protokoll	478
6.4.3	Ressourcenschonung mit Kunststoffen	480
6.4.4	Regenerative Energieerzeugung mit Kunststoffen	485
6.5	Fazit	488
6.6	Literaturverzeichnis	489
A	Empfehlungen zur Auffassung einer Bachelor-/Masterarbeit am IKT	491
A.1	Unterschiedlicher Anspruch an eine Bachelor-, Master- und Doktorarbeit	491
A.2	Wissenschaftliche Methoden	492
A.2.1	Quellen-untersuchende Methoden	492
A.2.2	Theoretische Methoden	492
A.2.3	Empirische Methoden	493
A.3	Wissenschaftliche Arbeit	494
A.4	Bachelor- oder Masterarbeit	495
A.4.1	Zum Titel der Abschlussarbeit	495
A.4.2	Zum Inhalt der Arbeit	495
A.4.2.1	Zusammenfassung	496
A.4.2.2	Einleitung	496
A.4.2.3	Hauptteil	496
A.4.2.4	Schlussbemerkungen	498
A.4.2.5	Anhang	498
A.4.3	Zum Umfang der Arbeit	498
A.4.4	Zum Schreibstil der Arbeit	498
Index	501	

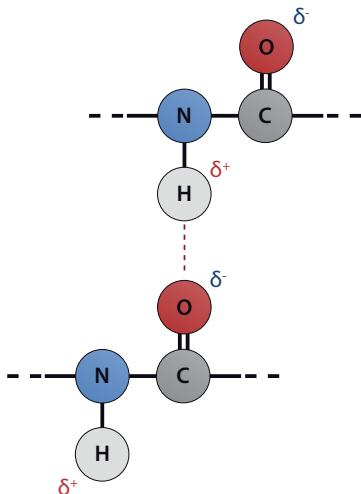


Bild 2.17 Wasserstoffbrückenbindungen

An ein weiteres elektronegatives Atom eines zweiten Makromoleküls ist das durch die Elektronenverschiebung partiell positiv geladene Wasserstoffatom dann stärker gebunden und wirkt somit als „Wasserstoffbrücke“ zwischen den beiden Molekülketten. Diese stärkste Nebenvalenzbindung gelangt mit ~ 20 kJ/mol in die Größenordnung von schwachen Hauptvalenzbindungen. In Bild 2.18 sind Wasserstoffbrückenbindungen in Polyurethan (PUR) und Polyamid (PA) verdeutlicht.

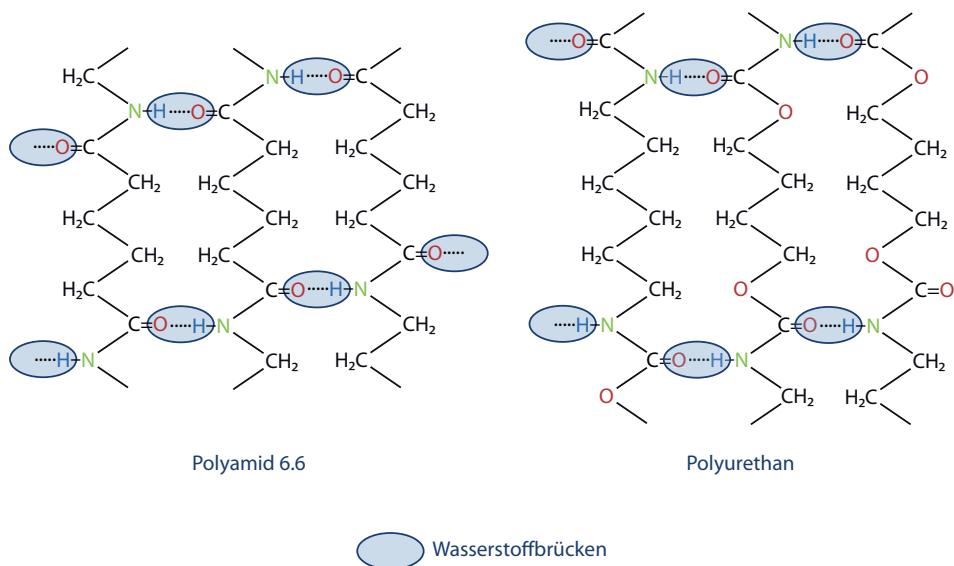


Bild 2.18 Wasserstoffbrückenbildungen am Beispiel von PA66 und PUR

Induktionskräfte

Sehr schwache Nebenvalenzbindungen sind die Induktionskräfte. Moleküle mit permanenten Dipolen können in benachbarten unpolaren Molekülen Elektronenverschiebungen hervorrufen und somit Dipolmomente induzieren. Die Bindungsenergie beträgt nur 1/500 bis 1/2000 einer Hauptvalenzbindung.

Zusammenfassend für die bereits aufgezählten Nebenvalenzkräfte gilt: Voraussetzung für das Auftreten von Dipol-Dipol-Kräften und/oder Induktionskräften ist das Vorhandensein von permanenten Dipolen.

Dispersionskräfte

Mit Bindungsenergien von 1/500 bis 1/1000 einer Hauptvalenzbindung sind Dispersionskräfte (auch Van-der-Waals-Kräfte, London'sche Kräfte) ebenfalls sehr schwach. Durch zufällige Bewegung der Elektronen und der daraus resultierenden Verformungen der Elektronenwolke entstehen auch in unpolaren Molekülen momentane Dipole. Diese schnell variierenden Dipole, die sich im zeitlichen Mittel zu Null kompensieren, induzieren in den Nachbarmolekülen im Takt ihrer eigenen Frequenzen ebenfalls Dipole, die allerdings nicht permanent sind.

Zur Verdeutlichung sind in Bild 2.19 aneinander gereihte Kugeln als Atome dargestellt, die untereinander durch Hauptvalenzbindungen verbunden sind und Polymerketten bilden. Zwischen den Polymerketten bestehen Nebenvalenzkräfte verschiedener Art, je nach Atomen der Polymerkette.

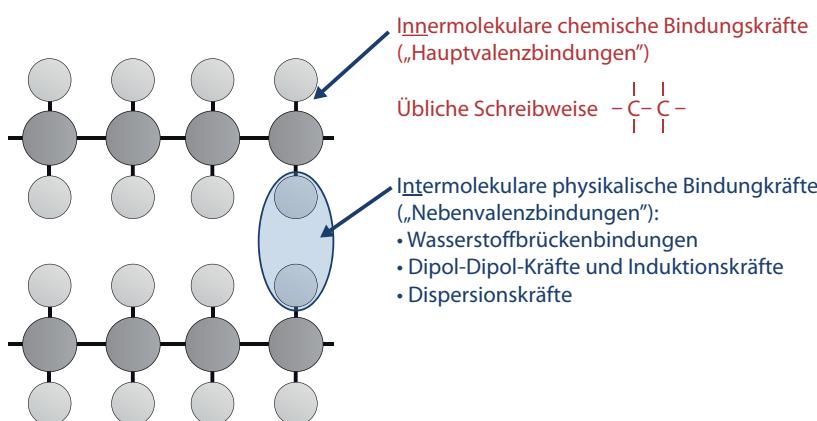


Bild 2.19 Verdeutlichung von chemischen und physikalischen Bindungskräften

repräsentiert (Kraft mal Weg = Energie). Die Steigung im Ursprung (hier rote gestrichelte Gerade) ist ein Maß für den E-Modul.

Die mechanische Beanspruchung von Festkörpern sowie Fluiden kann grundsätzlich durch Normalspannungen (Zug/Druck) und Schubspannungen beschrieben werden (Bild 2.40). Bestehen Zugspannungen, antwortet der Körper mit „Dehnung“. Bestehen Druckspannungen, nennt man die Antwort „Stauchung“. Bestehen Schubspannungen, heißt die Antwort „Scherung“.

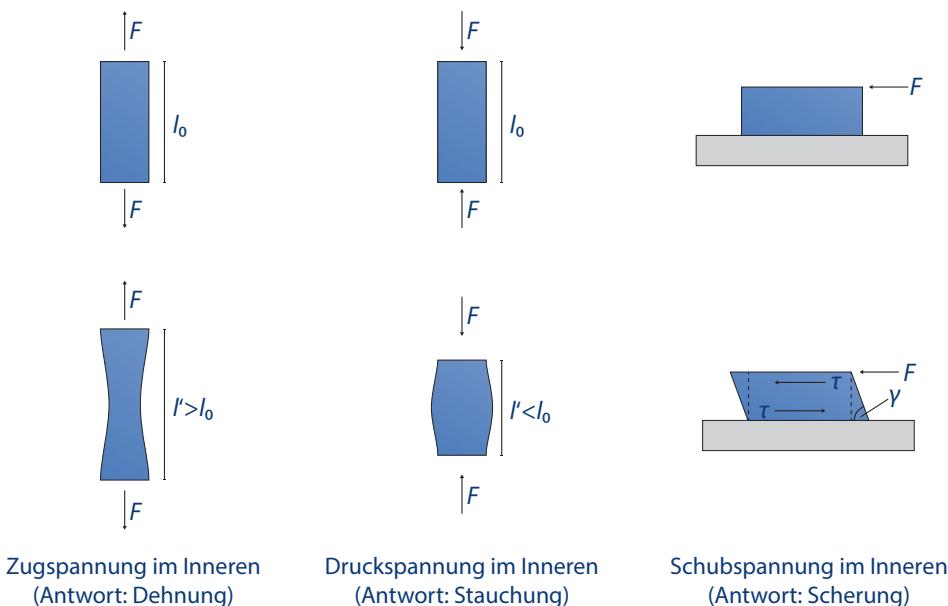


Bild 2.40 Typische Beanspruchungen und deren Antworten

In Bild 2.41 sind einige, häufig vorkommende Überlagerungen von Beanspruchungen aufgeführt: Das „Schälen“ geht nur bei nachgiebigen (weichen) Bauteilen. Die Rissfortschrittsfront ist zugleich immer wieder Hauptkraftangriffspunkt, daher gilt die schälende Beanspruchung als sehr anspruchsvoll. Eine Biegebeanspruchung, z.B. in dem hier dargestellten Balken, erzeugt eine Druckbeanspruchung (mit Stauchung) auf der Unterseite sowie eine Zugbeanspruchung (mit Dehnung) auf der Oberseite. Die virtuelle „neutrale Faser“ wird weder gedehnt, noch gestaucht. Eine Torsionsbeanspruchung erzeugt Schub-, Zug- und Druckspannungen mit ihren jeweiligen Antworten Scherung, Dehnung und Stauchung im tordierten Bauteil. Auch hier gibt es keine Beanspruchung in der neutralen Faser, welche hier im Bild identisch mit der Torsionsachse ist.

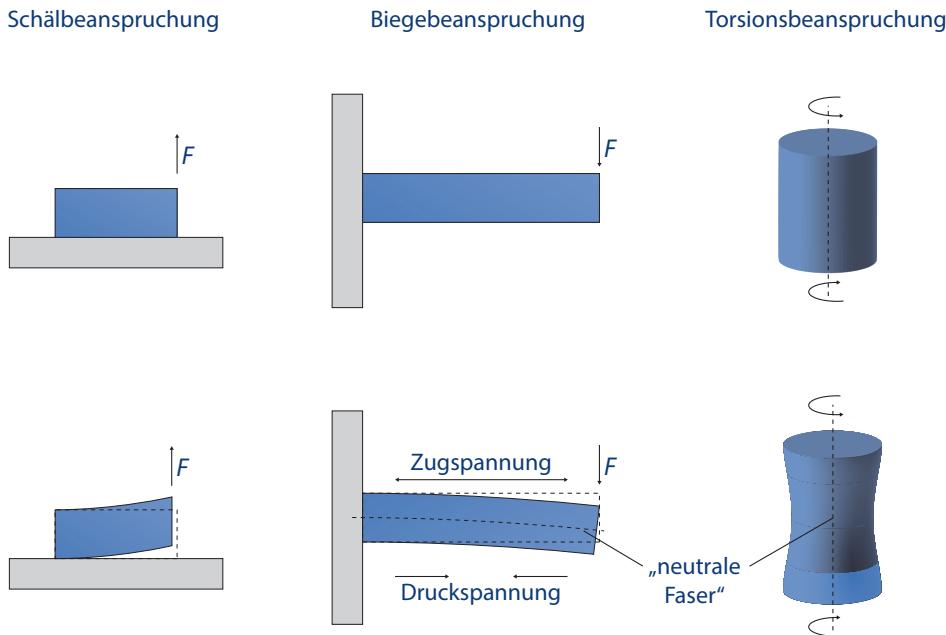


Bild 2.41 Überlagerte Beanspruchungen

2.2.2 Zustandsbereiche von Kunststoffen

Für das mechanische Verhalten von Kunststoffen bei Temperaturänderung erinnern wir uns daran, dass auch die Molekülbewegung der langen Polymerketten mit der absoluten Temperatur korreliert. Sie „schwingen“ stärker bei höheren Temperaturen, so dass sich deren mittlerer Schwingungsabstand erhöht. Ein größerer Schwingungsabstand im zeitlichen Mittel bedeutet zugleich geringere Nebenvalenzkräfte und somit die Möglichkeit, dass die Molekülketten bei geringerer Krafteinwirkung aneinander abgleiten und sich der Werkstoff dehnt.

2.2.2.1 Glasübergangstemperatur T_g

Als Glasübergang wird das Erweichen der amorphen Molekülstrukturen aufgrund zunehmender Brown'scher Molekülbewegung bei Erwärmung bezeichnet. Der Thermoplast geht von einem spröd-steifen in einen elastisch-nachgiebigen („thermoelastischen“) Zustand über (Bild 2.42). Amorphe Thermoplaste gehen bei weiterer Temperaturerhöhung kontinuierlich in den plastisch-nachgiebigen („thermoplastischen“) Bereich über.

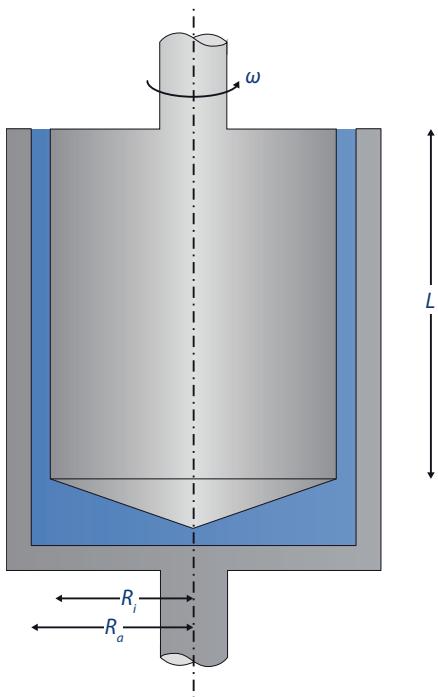


Bild 3.33 Das Couette-Rheometer

Versucharten mit Rotationsrheometern

Mit Rotationsrheometern können verschiedene Arten von Versuchen an Schmelzen durchgeführt werden (Bild 3.34). Mit konstanter Drehzahl und dadurch konstanter Schergeschwindigkeit kann über das sich einstellende Drehmoment die sich einstellende Schubspannung ermittelt werden. Bei diesem sogenannten **Spannversuch** lässt sich durch Variation der Drehzahl und damit der Schergeschwindigkeit die Viskositätsfunktion für kleine und mittlere Schergeschwindigkeiten ermitteln.

Mit einem Rotationsrheometer kann auch eine konstante Schubspannung aufgeprägt und die zunehmende Scherung aufgenommen werden. Dies wird als **Kriechversuch** bezeichnet. Andersherum kann im **Relaxationsversuch** eine konstante Deformation und damit Scherung induziert und die sich spontan einstellende Schubspannung mit deren Abklingen über der Zeit gemessen werden.

Im sogenannten **Schwingversuch** wird oszillierend Scherung induziert und das sich einstellende Drehmoment/Schubspannung gemessen. Der Schwingversuch gibt vor allem Auskunft über das viskoelastische Verhalten der Schmelze. Zwischen Verlauf des Scherwinkels und der Schubspannungsantwort entsteht eine Phasenverschiebung zwischen 0° (rein elastisches Verhalten) und 90° (rein viskos Verhalten), anhand derer sich die viskoelastischen Eigenschaften der Kunststoffschmelze charakterisieren lassen. Es lassen sich Speicher- und Verlustmodul (G' , G'') sowie die Dämpfung $\tan \delta$ ermitteln.

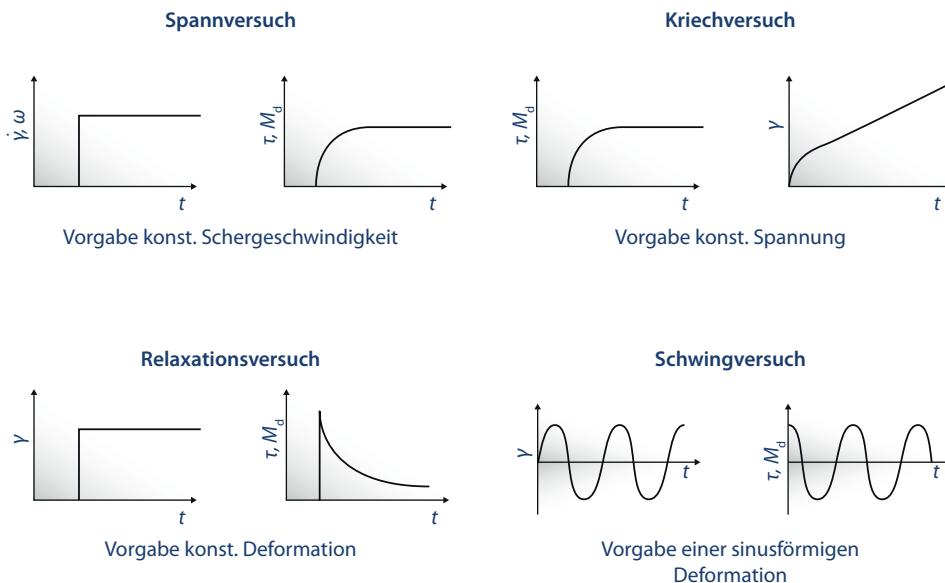


Bild 3.34 Verschiedene Versuchsarten mit Rotationsrheometern

In der in Bild 3.35 dargestellten qualitativen Viskositätskurve wird gezeigt, in welchem Schergeschwindigkeitsbereich die verschiedenen Rheometer arbeiten. Das Hochdruck-Kapillarrheometer kann zwar keine sehr kleinen Schergeschwindigkeiten realisieren, aber dafür den gesamten für die Kunststoffverarbeitung relevanten Schergeschwindigkeitsbereich abbilden: von den recht langsam Fließprozessen beim Thermoformen, über die Extrusion, bis hin zum Spritzgießen mit sehr hohen Schergeschwindigkeiten.

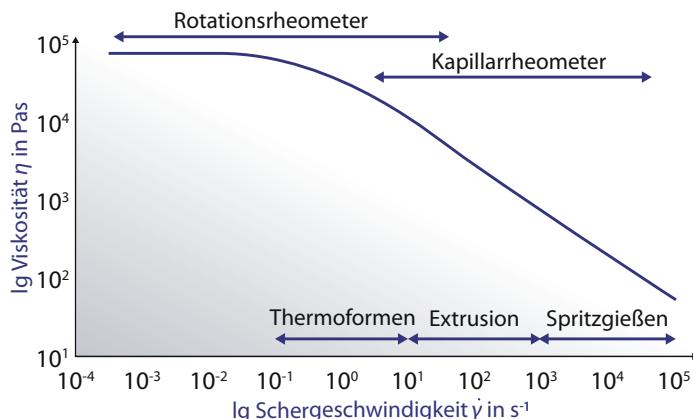


Bild 3.35 Einsatzbereich der Kapillar- und Rotationsrheometer

hier gewählten teilkristallinen Thermoplaste Polypropylen (PP) und Polyethylen hoher Dichte (PE-HD).

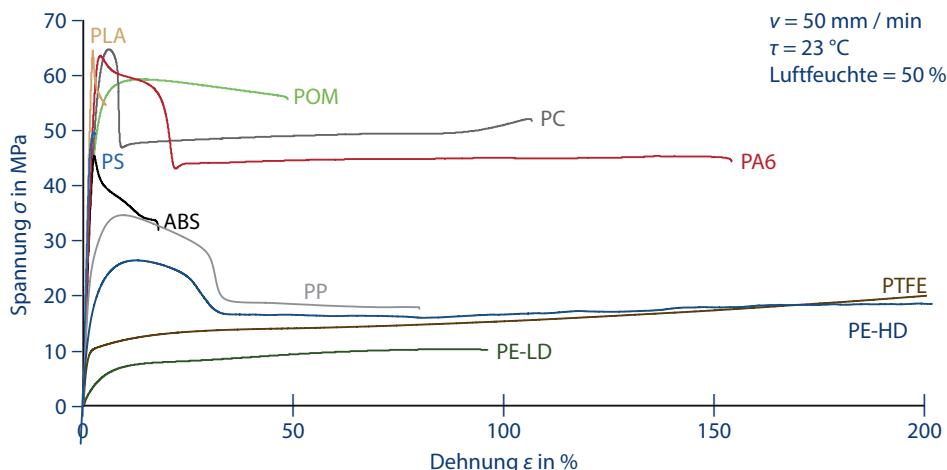


Bild 3.40 Vergleich verschiedener Thermoplaste

In Bild 3.41 ist eine typische Spannungs-Dehnungskurve eines teilkristallinen Thermoplasten qualitativ dargestellt. In der Nähe des Ursprungs, also im Bereich kleiner Dehnungen, verhalten sich Kunststoffe, auch Thermoplaste, linear-elastisch. Das heißt, sie würden sich nach geringer Deformation bei Entlastung spontan wieder auf den Ursprung zurückstellen.

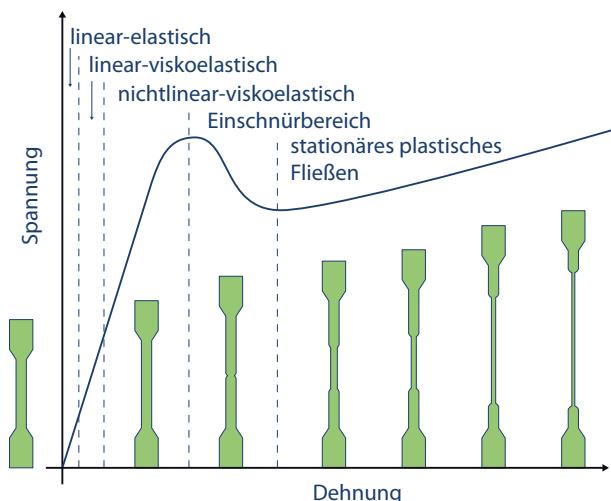


Bild 3.41 Verformungsverhalten unter Last; nach [3]

Dehnt man etwas weiter, überlagert sich ein Fließen, welches sich mit der Zeit wieder zurückstellen kann: hier verhält sich der Werkstoff linear-viskoelastisch. Im weiteren Dehnungsverlauf kommen irreversible Entschlafungen, Crazes und Mikrorisse, also ein irreversibler plastischer Anteil, hinzu. Ab jetzt verhält sich der Werkstoff insgesamt nichtlinear-viskoelastisch, denn er stellt sich nach Entlastung immer noch teilweise zurück.

Erst nach Überschreiten der Streckgrenze dominieren das viskose Verhalten und die plastische Deformation, auch erkennbar an der Einschnürung des Prüfkörpers mit einhergehender Querschnittsveränderung. Die elastische Rückstellung ist hier sehr gering.

3.2.1.2 Der Schnellzerreißversuch

Schnellzerreißmaschinen ermöglichen Zugversuche bei sehr hohen Geschwindigkeiten. In Bild 3.42 ist die Schnellzerreißmaschine des IKT mit Prüfgeschwindigkeiten von bis zu 20 m/s dargestellt. Im Hintergrund sieht man die hier zurückgefahrenen Temperierkammer, ganz ähnlich der des quasistatischen Zugversuchs (siehe oben), um den Temperatureinfluss ebenfalls erfassen zu können. Ein oberer Mitnehmer umgreift ein Querjoch, welches am oberen Teil einer Zugprobe angebracht wird. Die untere Einspannung wird hydraulisch betätigt.

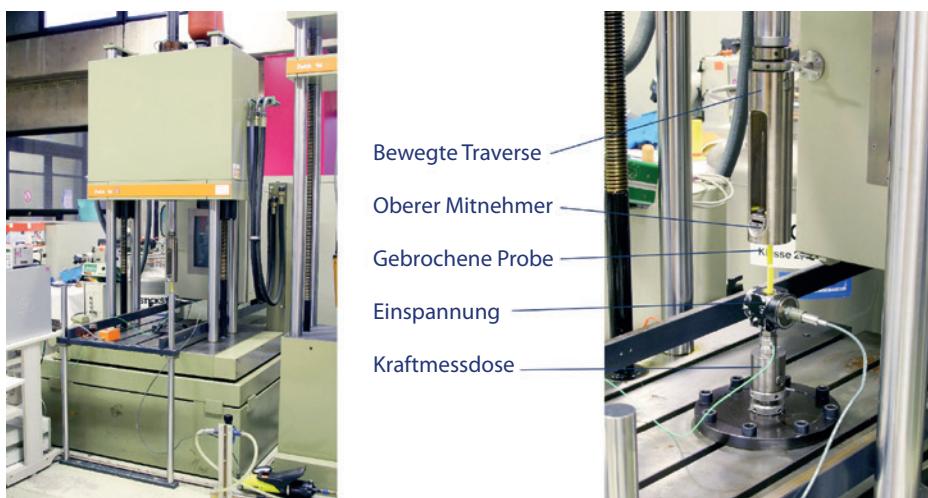


Bild 3.42 Schnellzerreißmaschine des IKT

Charakteristisch für diese Versuchsanordnung ist die uniaxiale Zugbeanspruchung mit Ermittlung eines Spannungs-Dehnung-Verlaufs wie beim quasistatischen Zugversuch, allerdings bei sehr hohen Geschwindigkeiten. Gegenüber dem Schlagzugversuch mit einem Pendelschlagwerk (siehe unten) können hier sehr



Bild 3.97 Freizeitanwendungen aus Faserkunststoffverbunden [Bildquelle: IKT, IFB, Löhmann]

3.3.1.1 Die Fasern und das Prinzip der Verstärkung

Ein kleiner Einblick in die Textiltechnik ist hilfreich: eingesetzt werden meist Glasfasern, Kohlenstofffasern (anorganisch) oder Aramid- und Naturfasern (organisch). Die Einzelfäden werden Filamente genannt und haben einen Durchmesser d von 5 bis 50 μm . Die eingesetzten Faserbündel können in Abhängigkeit von ihrer Länge in die folgende Gruppen eingeteilt werden:

0,1 bis 1 mm (Kurzfasern)	$l/d > 10$
1 bis 50 mm (Langfasern)	$l/d > 1000$
> 50 mm (Endlosfasern)	$l/d = \infty$

In Bild 3.98 wird schematisch verdeutlicht wie sich Steifigkeit, Festigkeit und Schlagzähigkeit von Kunststoffen in Abhängigkeit von der Faserlänge beeinflussen lassen. Während die Steifigkeit auch bereits bei kurzen Fasern recht stark beeinflusst wird, bewirken nur Langfasern und Endlosfasern einen Festigkeits- und Schlagzähigkeitssprung.

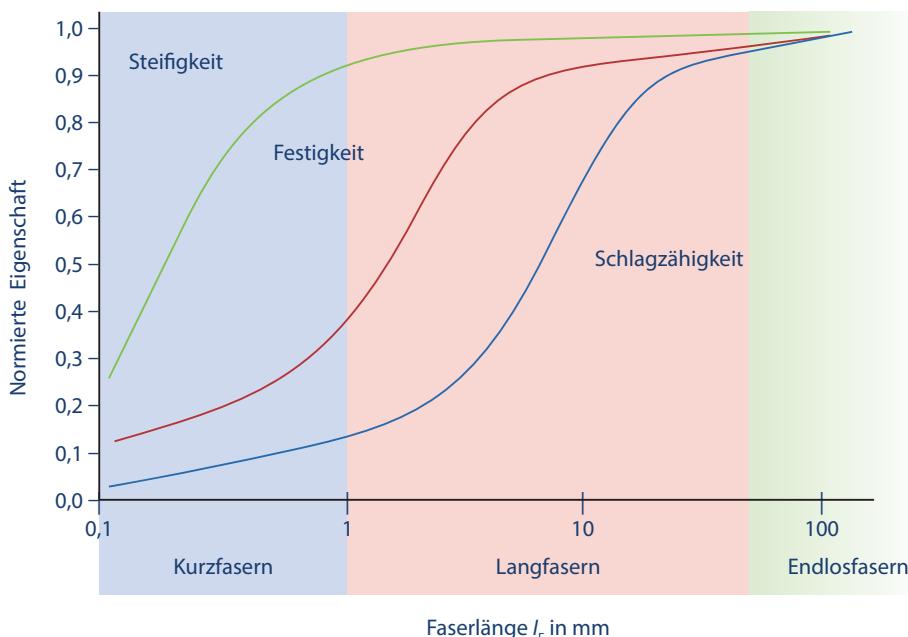


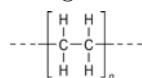
Bild 3.98 Faserlängen beeinflussen die mechanischen Eigenschaften von Faserkunststoffverbunden [5]

■ 3.8 Polyethylen (PE)

teilkristalliner Standardthermoplast

Kurzbeschreibung

Polyethylen kann in verschiedenen Polymerisationsverfahren hergestellt werden, die zu einer weniger oder mehr verzweigten Kettenstruktur führen.



Verarbeitung

Polyethylen kann in allen für Thermoplaste üblichen Verfahren verarbeitet werden. Alle Schweißverfahren, außer dem Hochfrequenzschweißen, sind ebenfalls einsetzbar. Kleben und Lackieren sind aufgrund der unpolaren Struktur nur nach Vorbehandlung der Oberflächen möglich.

Gebrauchseigenschaften

PE hat aufgrund der verschiedenen Herstellarten unterschiedliches Kristallisationsvermögen. Die mechanischen Eigenschaften steigen mit der Kristallinität. Low density Polyethylen (PE-LD) ist wenig steif und sehr dehnbar. Daher wird es selten als Konstruktionswerkstoff, meist als Folie verwendet.

High density Polyethylen (PE-HD) ist trotz des immer noch geringen Niveaus mechanischer Eigenschaften als Konstruktionswerkstoff zu nutzen. Es ist fest, steif und zäh genug, kriecharm und mittelmäßig wärmeformbeständig. Seine Gleit-Verschleiß-Eigenschaften und elektrischen Eigenschaften sind gut, seine Wasseraufnahme gering. Die chemischen Eigenschaften sind exzellent: Es ist beständig gegen Salzlösungen, Säuren, Laugen, Alkohole und Benzin. Unterhalb von 60 °C ist es in allen organischen Lösemitteln unlöslich, quillt aber in aliphatischen und aromatischen Kohlenwasserstoffen. Starke Oxidationsmittel, wie rauchende Schwefelsäure, konzentrierte Salpetersäure und Chromschwefelsäure, greifen Polyethylen an. Polyethylen ist unstabilisiert nicht UV-resistent und brennt wie Wachs.

Einsatzgebiete (Auswahl)

Konstruktionsbauteile: Spielzeug, medizinische Anwendungen, Gas- und Benzin-tanks, Chemikalienbehälter (aus Halbzeugen geschweißt), Reservekanister. Müllbehälter, Koffer, einfache Gartenbestuhlung, Haushaltsdosen und Flaschenkästen.

Andere Bauteile: Verpackungen, Verschlüsse, Rohrleitungen.

Handelsnamen (Auswahl)

Alathon, Dowlex, Eltex, Eraclene, Escorene, Finathene, Fortiflex, Formolene, Hostalen, Lacqtene, Lupolen, marlex, Microthene, NeoZex, Novapol, Perothene, Polisul, Rigidex, Sclair, Sholex, Samylan, Samylex, Sumikathene, Unipol, Vestolen.

Guter Rat

Polyethylen ist kostengünstig und vielseitig. Wenn die Anforderungen an die mechanischen Eigenschaften, insbesondere die bei höheren Temperaturen, nicht zu hoch sind (geringe Steifigkeit!), kann PE auch für komplexe Bauteile eingesetzt werden.

Eigenschaften von Polyethylen

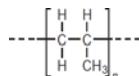
siehe Seite 211

■ 3.9 Polypropylen (PP)

teilkristalliner Standardthermoplast

Kurzbeschreibung

Polypropylen wird durch Polymerisation von Propylen hergestellt.



Verarbeitung

Alle für Thermoplaste üblichen Verarbeitungsverfahren sind möglich. Mittels Spritzgießen werden Formteile, mittels Extrusion Blasfolien, Flachfolien und mittels Extrusionsblasformen auch behälterartige Bauteile hergestellt. Glasmattenverstärkte PP-Päckchen werden im GMT-Verfahren verarbeitet. Alle Schweißverfahren, außer dem Hochfrequenzschweißen, sind einsetzbar.

Gebrauchseigenschaften

Polypropylen ist kratzfester als PE, hat eine höhere Festigkeit, Steifigkeit und Schmelztemperatur bei noch geringerer Dichte. Es ist zäh und schlagzäh (insbesondere als Copolymer PP-B). Bei tiefen Temperaturen wird das Homopolymer (PP-H) spröde.



Bild 4.19 Profilquerschnitte



QR-Code 4-4

Das Video zeigt die Extrusion eines Fensterprofils aus PVC: Werkzeugaustritt, Kalibrierung, Kühlung, Abzugseinheit und Konfektionierung (Aluplast GmbH, Karlsruhe).

<http://www.ikt.uni-stuttgart.de/links/Videolinks/Profilextrusion>

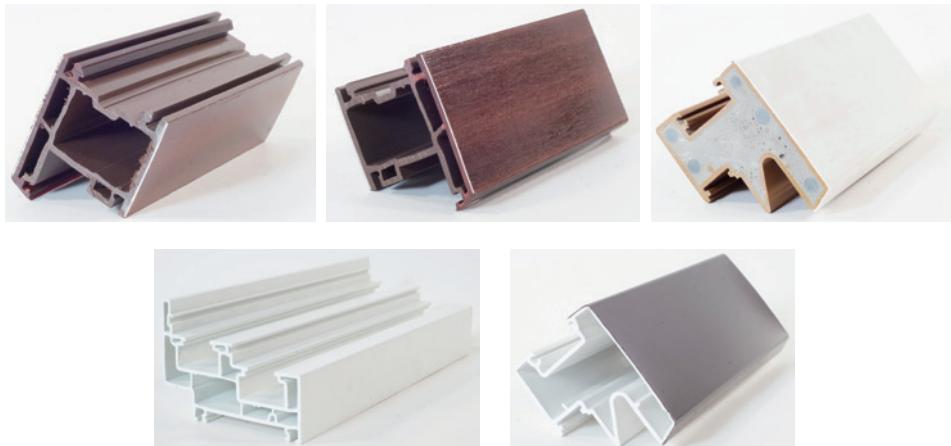


Bild 4.20 Fensterprofile

Der Werkzeugaustritt hat in der Regel nicht exakt dieselbe Form und dieselben Maße wie das spätere Profil (Bild 4.21). Form und Maße des Extrudatstrangs werden nach dem Austritt aus dem Werkzeug von mehreren Faktoren beeinflusst:

- die Abzugskraft,
- die Strangauflistung (siehe Abschnitt 3.1.6),
- die Relaxationsvorgänge in der Schmelze und
- die Abkühlgeschwindigkeit.

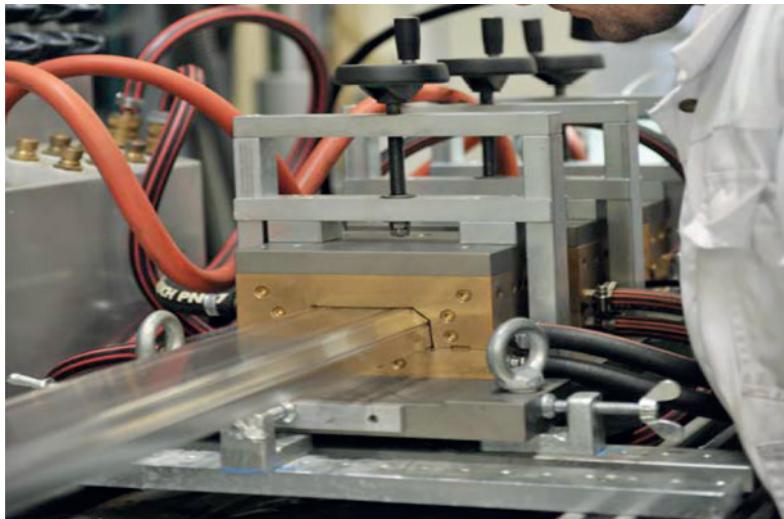


Bild 4.21 Profilextrusion [Bildquelle: Technoform Kunststoffprofile GmbH]

Betrachten wir verschiedene Abzugsgeschwindigkeiten des Profils (Bild 4.22): Tritt ein Schmelzestrang aus dem Werkzeug aus, weitet sich der Schmelzestrang meist etwas auf. Die Moleküle werden im Fließspalt zusammengedrückt und durch Scherung orientiert. Nach dem Düsenpalt kann sich der verbliebene elastische Teil sofort zurückstellen (siehe Abschnitt 3.1.6) und der Schmelzestrang weitet sich auf. Wird die Abzugsgeschwindigkeit erhöht, kann der aufgeweitete Schmelzestrang wieder auf Düsenmaß gelängt werden. Wird sie noch mehr erhöht, kann sogar ein Maß kleiner Düsenaustrittsmaß erzielt werden. Üblicherweise folgen dem Werkzeugaustritt noch Kalibriereinrichtungen, in denen das Profil unter Formzwang abgekühlt wird, um die Maßhaltigkeit sicherzustellen.

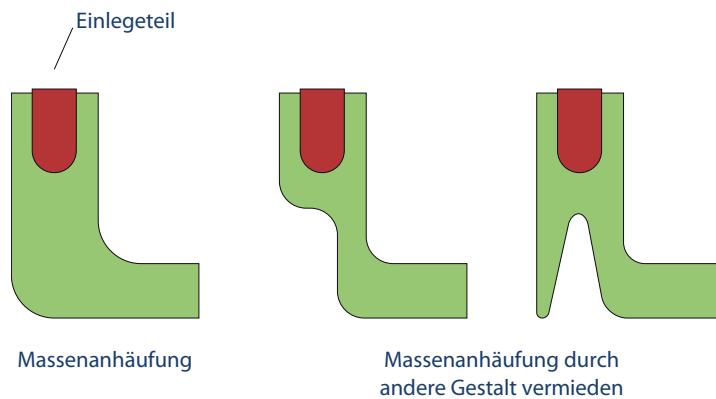


Bild 5.34 Vermeidung von Massenanhäufungen

Das Bild 5.35 gibt Vorschläge zur Vermeidung von Massenanhäufungen in den Eckbereichen eines Bauteils.

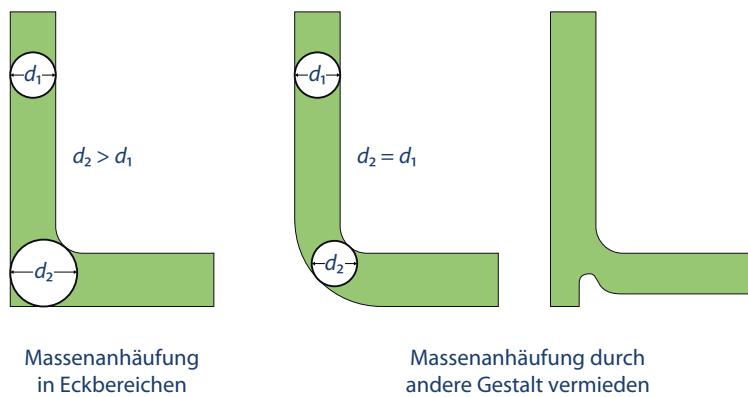
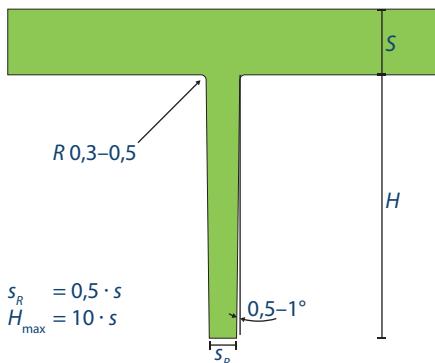


Bild 5.35 Vermeidung von Massenanhäufungen im Eckbereich [12]

Auch Rippen sollten relativ dünnwandig ausgeführt werden, um einen schnellen Wärmeabtransport zu ermöglichen und somit die Kühlzeit gering zu halten. Wird die Bauteilsteifigkeit nicht erreicht, sollte daher eher die Anzahl der Rippen als deren Dicke erhöht werden. In Bild 5.36 werden empirisch ermittelte Auslegungsempfehlungen dargestellt.

**Bild 5.36**

Auslegungsempfehlung – empirisch ermittelt

Als Richtwert für die Rippendicke S_R und die Rippenhöhe H gilt:

$$S_R \approx 0,5 \cdot S \quad (5.3)$$

$$H_{\max} \leq 10 \cdot S \quad (5.4)$$

Der Rippenfuß ist mit einem Radius zu versehen, um die Kerbwirkung zu reduzieren. Zugleich darf der Radius nicht zu groß gewählt werden, um Dickstellen und somit Massenanhäufungen zu vermeiden.

Ist der Rippenfuß zu dick, besteht die erhöhte Gefahr von Einfallstellen und eine längere Kühlzeit ist erforderlich. Das Bild 5.37 zeigt die Vergrößerung des Inkreis-Radius des Rippenfußes mit steigender Rippendicke und größerem Verrundungsradius. Durch die so entstehende Massenanhäufung steigt die Gefahr von Einfallstellen. Die steigende durchschnittliche Einfalltiefe durch zu dicke Rippe ist in Bild 5.38 dargestellt.

Index

A

- Abbindemechanismus
 - chemisch 368
 - physikalisch 368
- Abkühlgeschwindigkeit 46
- Abminderungsfaktor 428
- ABS 206
- Absorption 121
- Abstaelement 177
- Acrylester-Styrol-Acrylnitril 11
- Acrylnitril 462
- Acrylnitril-Butadien-Styrol *siehe* ABS
- Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymere 221
- Acrylnitril-Styrol-Acrylester-Copolymere 222
- Additive 50, 147, 165
- additive Verfahren *siehe* Rapid Prototyping
- Adhäsion
 - mechanisch 368
 - spezifisch 369
- Alterung 37, 192, 388, 431
 - beschleunigte 432
- Alterungsmechanismus
 - chemischer 197
 - mechanischer 194
 - physikalischer 195
- Aluminium 2
- Angussystem 298, 300
- Anisotropie 147, 154
- Antioxidantien 200, 463
- Arrhenius-Gleichung 433
- Atombindung *siehe* Hauptvalenzbindung
- Atomic Force Mikroskop *siehe* Rasterkraftmikroskop
- Aufbereitung 69, 168, 174
 - von Biopolymeren 476
- Aufschmelzzone 267
- Ausarbeitungsphase 436
- Auslegung
 - mechanische 300, 423
 - rheologische 300, 331
 - thermische 300, 302
- Ausstoßzone *siehe* Austragszone
- Austragzone 267, 270, 274

B

- Baekeland, L. H. 3
- Bagley-Korrektur 94
- Bakelit 3
- Barriereschicht 146, 288, 457
- Barriereschnecke 275
- Barrierefunktion 375
- Bayer, O. 5
- Beanspruchung
 - dynamisch 388
- Bedampfen *siehe* Beschichten
- Bedrucken *siehe* Beschichten
- Beflocken *siehe* Beschichten
- Belastung
 - dynamisch 388
- Benetzung 375
- Benzol 462
- Beschichten 50, 374, 375, 378
 - hydrophil 375
 - hydrophob 375
- Biegeversuch 114
- Billig-Image 9
- Bindenahrt 187, 357, 421
- Bindigkeit 29
- Bindung
 - kovalente *siehe* Hauptvalenzbindung
 - physikalische *siehe* Nebenvalenzbindung
- Bioabbaubar 466, 472, 488
- biobasiert 471, 488
- Biokunststoff 465 *siehe* bioabbaubar,
oder: biobasiert
- Biomasse 471
- Biosynthese 15
- Bisphenol A 462
- Blasfolienextrusion 278, 284
- Blaskopf 285
- Blend 19, 37, 168, 476
- Bohren 354
- Brechungsindex 123
- Breitschlitzdüse 278, 283
- Brennstoffzelle 487
- Brown'sche Molekularbewegung 34, 46, 55

Brundtland-Bericht 478
Burger-Modell 62

C

Caprolactam 155
CARPOW-Ansatz 83
Carreau-Ansatz 77
Celluloid 3
Cellulose 15
CO₂-Fußabdruck 483
CO₂-Neutralität 472
Co-Extrusion 287
Compoundieren *siehe* Aufbereitung
Computertomographie 162
Copolymer 19, 169
Couette-Rheometer *siehe* Rotationsrheometer
Craze 61

D

3-D-Printing 440
Dämmung 129, 481
Dämpfer 60
Dämpfung *siehe* Verlustfaktor
Dehnfähigkeit 387
Dehnrrheometer 100
Dehnung 52, 54
- Bruch- 53, 168
- kritische 430
- Randfaserdehnung 428
- Streck- 53
- zulässige 429
Delamination 159
Design 8
Desorption 143
Dichte 135, 328, 386
Differential Scanning Calorimetrie 133, 202
Diffusion 143
Dipol-Dipol-Kräfte 31
Direktverarbeitungsverfahren *siehe* Spritzgießen
compoundieren
Dispersionskräfte 33
Doppelschneckenextruder 168, 175
- gegenläufig 175
- gleichläufig 175, 178
Doppelstegdornhalter *siehe* Stegdornhalter
Drehen 355
Drehsteller 314
Drei-Zonen-Schnecke 267, 295
Druckaufbauzone 180
Druckverlust 420
DSC *siehe* Differential Scanning Calorimetrie
Duales System *siehe* Recycling
duktil 52
Durchschlagfestigkeit 118
Durchstrahlschweißen 365
Duromer 35, 58, 154, 323

Duroplast *siehe* Duromer
Dynamische Differenzkalorimetrie *siehe* Differential Scanning Calorimetrie

E

Eckenverzug *siehe* Winkelverzug
Eigenschaften
- akustische 128
- elektrische 117, 389
- magnetische 119
- optische 120
- physikalische 117
Eigenspannung 139, 184, 185, 357
eindimensionale Strömung 71
Einfallstellen 412
einfärben 9
Einlaufdruckverlust 94
Einschneckenextruder 266
Einspritzaggregat 295
Einspritzdüse
- offene 297
Einspritzeinheit 291
Einspritzphase 305
Ein-Stationen-Maschine 350
Einzugszone 178, 267
elastisch 59
Elastomer 35, 57, 323, 326
- thermoplastischer 37
Elektronengas 28
Elektrotechnik 3
E-Modul 59, 103, 155
Energie
- spezifische 180
Energieeffizienz 481
Energieerzeugung
- regenerative 485, 489
Entformungsschräge 422
Entformungssystem 298, 299
Entgasungszone 178
Enthalpie
- spezifische 130
Entsorgungsweg 470
Epoxidharz 154, 256
Erdöl *siehe* Rohstoffe, fossile
Ersatzmodell
- mechanisches 59
Ethen *siehe* Ethylen
Ethylen 14
Ethylen-Propylen-(Dien)-Copolymere 210
Extruderschnecke 267
Extrusionsblasformen 286, 320

F

Faser 147
- Aramid- 153
- -bruch 159

- -bündel *siehe* Roving
 - Chemie- 49
 - Endlos 151, 333, 334, 336, 338, 341
 - Glas- 148, 153
 - -halbzeug 152
 - Kohlenstoff- 149, 153
 - Kurz 151, 189, 333, 334
 - Lang 151, 333, 334, 336
 - Natur- 49, 153
 - neutrale 54
 - -verstärkung 154
 - Faserkunststoffverbund 148, 333, 482, 486
 - dreidimensionale FKV-Strukturen 343
 - Faserrichtung *siehe* Orientierung
 - Faserspritzen 334
 - Faserverbundkunststoff *siehe* Faserkunststoffverbund
 - Faserwickeln 344
 - FDM *siehe* Fused Deposition Modeling
 - Feder 59
 - Feingießen 445
 - Fernordnung 41, 46
 - Festigkeit 51, 387
 - Feststoffförderung 271
 - Feststoffkanal *siehe* Barriereschnecke
 - Filmscharnier 372, 403, 424, 429
 - Filtermodell 390
 - Flächenträgheitsmoment 328, 405
 - Flachfolienextrusion 283
 - Flachfolienwerkzeug *siehe* Breitschlitzdüse
 - Flammschutzmittel 463
 - Flanke
 - akive 273
 - passive 273
 - Flechten 343
 - Fließaktivierungsenergie 81
 - Fließbehinderung *siehe* Fließgrenze
 - Fließgrenze 83
 - Fließhilfsmittel 165
 - Fließmarkierung 279
 - Fließverhalten
 - Newton'sch 73
 - strukturviskos 73
 - Fließweg 420
 - Fluidinjektionstechnik 317
 - Fluidität *siehe* Potenzansatz
 - Förderelement 177
 - Förderzone 178
 - Formaldehyd 462
 - Formfräsen 353
 - Formgebungswerkzeug *siehe* Werkzeug
 - Formnest *siehe* Kavität
 - Fotovoltaik 486
 - Fragmentierung 460, 468
 - Fräsen 353
 - Formfräsen 353
 - Umfangsfräsen 353
 - Freischwinger-Stuhl 11
 - Fügen 371
 - Füllbildsimulation 421
 - Füllstoffe 36, 147, 173
 - organische 173
 - Funktionselemente 401
 - Funktionsintegration *siehe* Funktionselemente
 - Fused Deposition Modeling 441
- G**
- Galvanisieren *siehe* Beschichten
 - Ganghöhe 268
 - Gangsteigung 268
 - Gangsteigungswinkel 268
 - Gasinjektionstechnik *siehe* Fluidinjektionstechnik
 - Gelpermeationschromatographie 27
 - Gestaltungsfreiheit 8, 401
 - Glasübergang 55, 135
 - Glattrohrextruder 268
 - Global Warming Potential 483
 - Glukose 15
 - GMT *siehe* Thermoplast, glasmattenverstärkt
 - Goodyear, C. 36
 - Granulierung 183
 - Heiß- 183
 - Kalt- 183
 - Nass- 183
 - Strang- 183
 - Trocken- 183
 - Unterwasser- 183
- H**
- Haftvermittler 171
 - Halbzeug 346
 - Handlaminieren 334
 - Haptik 9
 - Härter 323, 334
 - Harz 324, 334
 - Harzgießen 444
 - Harzinjektionsverfahren 341, 344
 - Harznest 159
 - Hauptvalenzbindung 29
 - Hautkomponente 315
 - Heizelementschweißen 358
 - Helibar® 275
 - Henry'sches Gesetz 143
 - Hinterschnitt 421
 - Hinterspritztechnik 318
 - Hochdruck-Kapillarrheometer 93
 - Hochleistungsextruder *siehe* Helibar
 - hormonaktiv 462
 - Hyatt, J. W. 3
 - Hydrolyse 199

I

Induktionskräfte 33
 Infrarot-Spektroskopie 202
 Initiator 16
 Inline-Produktion 351
 Innovationsstoff 9
 Insert 405
 Integralschaum 329
 Interferometrie 161
 Isotropie 154

- Standard- *siehe* Massenkunststoff
 - technischer 204
 Kunststoffabfälle 455, 457, 488
 Kunststoffflaschen 6
 Kunststoffstaub 459, 468
 Kunststofftechnik 64
 Kunststofftragetasche 485
 Kunststoffverbrauch 7
 Kyoto-Protokoll 479, 484

L**K**

Kaschieren *siehe* Beschichten
 Kaskadenspritzgießen 311
 Katalysator 18, 36
 Kautschuk 326
 Kavität 292, 298, 313, 335
 Kegel-Platte-Rheometer *siehe* Rotationsrheometer
 Keimbildner 170
 Kelttool 447
 Keramikstrahler 347
 Kerbeffekt 423
 Kerbschlagzähigkeit 168
 Kerbwirkung *siehe* Kerbeffekt 423
 Kernkomponente 316
 Kernschicht 190
 Kettenwachstumsreaktion 17
 Klatte, F. 4
 Kleben 50
 Kohäsion 366
 Kompressionszone *siehe* Aufschmelzzone
 Konfiguration 38
 Konformation 40
 Konstitution 38
 Konstruieren
 - beanspruchungsgerecht 423
 - fertigungsgerecht 420
 - werkstoffgerecht 409
 Konstruktionstechnik 64
 Konsumgüter 8
 Kontraktion
 - thermische 185
 Konverter 362
 Konzeptphase 436
 Kratzfestigkeit 375
 Kriechen *siehe* Retardation
 Kristallinität *siehe* Kristallisationsgrad
 Kristallisation 42, 184, 190
 Kristallisationsgrad 43
 Kristallschmelztemperatur 56, 135
 Kugelgelenkverbindung 371
 Kühikanal *siehe* Temperiersystem
 Kühzeit 293, 359, 420
 Kunststoff 9, 63
 - Hochleistungs- 205
 - Massen- 204

La Chaise 10
 Lackieren *siehe* Beschichten
 Lamelle 48
 Laminat 157
 Laminated Object Manufacturing 439
 Laserschweißen 365
 Lasersintern 447
 - selektives 439
 Lastenheft 395
 L/D-Verhältnis 181, 268
 Lebensdauervorhersage 431
 Lebensmittelverpackungen 6
 Leckstrom 273
 Leichtbau 5, 147, 482
 Leitfähigkeit 375
 Lichtschutzmittel 200, 463
 Life Cycle Assessment 484
 LOM *siehe* Laminated Object Manufacturing
 Lunker 282, 412

M

Makromolekül 14, 30
 Massendurchsatz 180
 Massenanhäufung 305, 413
 Material 69
 Matrix 154
 Maxwell-Modell 62
 mechanische Bearbeitung 352
 Mehrkopfanlage 363
 Mehrstationen-Maschine 351
 Melaminformaldehydharz 258
 Metallbindung 28
 Metallspritzen 446
 MFI *siehe* Schmelzeindex
 MFR *siehe* Schmelzeindex
 migrationsfähig 462
 Mikro-Formschluss 368
 Mischelement 177
 - dispersiv 274
 - distributiv 274
 Mischen
 - dispersiv 163, 176
 - distributiv 176
 Mischungsregel 155
 Mischzone 178

Molekulargewicht *siehe* Molmasse
 Molmasse 22, 166, 462
 Molmassenverteilung 23, 81, 201
 Monomer 13, 155
 - Restmonomer 462
 Montagespritzgießen 313, 314
 Multi-Axial-Gelege 152

N

Nachdruckphase 293, 307
 Nadelverschlussdüse *siehe* Verschlussdüse
 Nahordnung 41
 Nanopartikel 163
 Nanoröhrchen 164
 Naphta 14
 Nebenvalenzbindung 30, 42
 Negativformung 346
 Nieten 374
 Normalspannung 54
 Nukleierungsmittel *siehe* Keimbildner
 Nutbuchsenextruder 268
 Nylon *siehe* Polyamid

O

Ökotoxizität 469
 Oligomer 14
 Ölpreis 473
 Ondulation 159
 Opazität 42, 124
 Organoblech 320, 340
 Orientierung 357
 - Faserorientierung 152, 156, 189, 335, 411, 421
 - Molekülorientierung 125, 184, 186, 411, 421
 Outsert 404
 Oxidation 198

P

Panton-Chair *siehe* Freischwinger-Stuhl
 Perkolationsschwelle 118
 Permeation 143, 144
 Permeationsbarriere 376
 Peroxide 37
 PET 206, 232, 463, 484
 Phenol-Formaldehydharz 259
 Phenolharz 259
 Phtalate 463
 Plastifizieraggregat *siehe* Einspritzaggregat
 Plastifizierzone 178
 Plastik *siehe* Kunststoff
 Plastiktüte *siehe* Kunststofftragetasche
 plastisch 61, 345
 Plattenautomat 350
 Platte-Platte-Rheometer *siehe* Rotationsrheometer
 Plexiglas *siehe* PMMA
 PMMA 206

Polarisationsfilter 47
 Polarität 370
 Polieren 354
 Polyaddition 21, 330
 Polyamid 5, 206, 225
 Polybutylenterephthalat 231
 Polycarbonat 5, 206, 235
 Polydispersität 24
 Polyetheretherketon 243
 Polyethersulfon 245
 Polyethylen 5, 18, 206, 208
 Polyethylenterephthalat *siehe* PET
 Polykondensation 20
 Polymer 13, 64, 461
 Polymerblend *siehe* Blend
 Polymerchemie 13
 Polymerisation *siehe* Polymersynthese
 - radikalische *siehe* Kettenwachstumsreaktion
 Polymermembran 487
 Polymersynthese 16
 - In-situ- 155
 Polymethylmethacrylat 4, 237
 Polyolefin 206
 Polyoxymethylen 239
 Polyphenylensulfid 247
 Polypropylen 206, 209
 - langglasfaserverstärktes 11
 Polyreaktion *siehe* Polymersynthese
 Polystyrol 5, 18, 206, 215
 - expandiertes 5, 206, 481
 Polysulfon 245
 Polytetrafluorethylen 206, 242
 Polyurethan 5, 11, 21, 206, 255, 328, 481
 Polyvinylchlorid *siehe* PVC
 Porzellan 2
 Positivformung 348
 Potenzansatz 76
 Prägespalt 310
 Preform 341
 Prepreg 340
 Pressen 325, 335
 Primärstruktur 38, 43
 Produkte
 - behälterartig 394, 451
 - gehäuseartig 393, 449
 - großflächig 392, 449
 - komplex 394, 452
 Produktentwicklung 385
 Profilextrusion 279
 Propen *siehe* Propylen
 Propylen 14
 Prototyp 436
 - Funktions- 448, 450, 452
 - Geometrie- 448, 450, 451, 452
 - Konzeptmodell 448, 450, 451, 452
 - technischer 448, 451, 452, 453
 Pultrusion 338
 PVC 4, 18, 166, 206, 213, 463

Q

quasi-isotrop 158

R

Radikal 16, 37

Randschicht 190

Rapid Prototyping 436

Rapid Tooling 303, 443

Rasterkraftmikroskop 169

Reaction Injection Molding 331, 443

Recycling 456

Recyclingfähigkeit 378

Reflexion 121

Renault, H. V. 4

Reibeigenschaft 375

Reibklotz 61

Relaxation 111

Reptationsmodell 75

Resin Transfer Molding 341

Ressourcenschonung 480, 488

Retardation 111

Rheologie 70

Rheometer

- Dehn rheometer 100

- Hochdruck-Kapillarrheometer 93

- Rotationsrheometer 95

Rheometrie 91

Ringanguss *siehe* Angussystem

Ringschnappverbindung 371

Rippe 405, 414

- Rippenkreuzung 417

Rohrextrusion 278

Rohrströmung *siehe* eindimensionale Strömung

Rohstoffe

- fossile 13, 458, 471

- nachwachsende 15, 471

Rollenautomat 351

Roving 152

RTM *siehe* Resin-Transfer-Molding

Rückströmsperre 295

S

Sägen 352

Sagging 165

Sandwich-Spritzgießen 315

Schallenergie *siehe* Ultraschall

Schaum 190, 310, 328

- geschlossen zellig 191

- offen zellig 191

Scheibenanguss *siehe* Angussystem

Schergeschwindigkeit 72

- Übergangsschergeschwindigkeit 78

Scherung 54, 187

Schichtsilikat 164

Schirmanguss *siehe* Angussystem

Schlack, P. 5

Schlagbiegeversuch 115

Schlagpendel *siehe* Schlagbiegeversuch

Schlagzähigkeit 115

Schlagzähmodifizierer 168

Schlauchextrusion *siehe* Blasfolienextrusion

Schleifen 354

Schleppströmung *siehe* eindimensionale Strömung

Schließeinheit 291, 297

Schmelzefilter 182

Schmelzefront 187

Schmelzeindex 92

Schmelzekanal 276 *siehe* Barrièreschnecke

Schmelzemassefließrate 92

- mechanisches 59

Schnapphaken *siehe* Schnappverbindung

Schnappverbindung 371, 402

Schneckenspiel 268

Schneckenraum 295

Schnell, H. 5

Schnellzerreißversuch 105

Schraubdom 403, 418, 427

Schraubverbindungen 372

Schrumpf 90

Schubmodul 95

- elastischer *siehe* Speichermodul

Schubspannung 54, 72

Schweißen 356

Schweißextruder 361

Schweißzyklus 359

Schwermetalle 469

Schwindung 90, 185, 307, 411

Schwingversuch 98, 111

Sekundärstruktur 40

Shearographie 161

Sheet Molding Compound 335

Sicherheitsfaktor 428

Siebdruckverfahren 381

Siebrad *siehe* Schmelzefilter

Siegelzeit 293

SLA *siehe* Stereolithographie

SLS *siehe* Lasersintern

SMC *siehe* Sheet Molding Compound

Sonotrode 362

Sorption 143

Spaltströmung *siehe* eindimensionale Strömung

Spannung 52

- Bruch- 53

- zulässige 426

Spannungs-Dehnungs-Diagramm 52

Spannungs-Dehnungskurve 104

Spannungsrissbildung 196

Speckle-Interferometrie *siehe* Interferometrie

Speichermodul 95, 166

Sphärolith 46, 170

Spritzgießcompoundieren 312

Spritzgießen 11, 289, 327

- Spritzgießmaschine 291
 Spritzgieß-Sonderverfahren 308
 Spritzgießzyklus 292
 Spritzprägen 309
 Spritzstreck-Blasformen 320
 spröde 52
 Stabilisator 199
 - Bio- 200
 - UV- *siehe* Lichtschutzmittel
 Standardkunststoff *siehe* Kunststoff: Massenkunststoff
 Stärke 15
 Stastny, F. 5
 Stauchung 54
 Staudinger, H. 4
 Stegbreite 268
 Stegdornhalter 279
 Steifigkeit 51 *siehe* E-Modul
 Steiner'scher Anteil 406
 Stereolithographie 437, 444
 Strangauflistung 89, 280
 Streckgrenze 53
 Strömung
 - laminare 304, 306
 - turbulente 304
 Strukturschaum *siehe* Integralschaum
 Stufenwachstumsreaktion 20
 Styrol 462
 Styrol-Acrylnitril-Copolymere 218
 Styrol-Butadien-Styrol-Copolymere 217
 Styropor *siehe* Polystyrol, expandiertes
- T**
 Taktizität 39
 Tampondruckverfahren 381
 Tapelegen 344
 Tauchkantenwerkzeug 310, 325
 Teflon *siehe* Polytetrafluorethylen
 teilkristallin 42
 Temperaturleitfähigkeit 140
 Temperaturverschiebung 80
 Temperierkanal *siehe* Temperiersystem
 Temperiermedium 304
 Temperiersystem 302
 - variotherm 321
 Tempern 188, 202
 Tertiärstruktur 40, 46
 Textiltechnik 49
 thermisches Langzeitdiagramm 433
 thermoelastisch 55
 Thermoformen 345
 Thermographie 160
 Thermoplast 35, 154
 - amorph 41, 55, 391
 - glasmattenverstärkt 338
 - teilkristallin 42, 56, 391
 thermoplastisch 55
- Thermoplastisches Polyurethan 254
 Thermoplast-Pultrusion 339
 Thermoplastschaum-Spritzgießen 310
 Thermoplastspritzen 292
 Tiefziehen *siehe* Thermoformen
 tie molecules *siehe* Verbindungsmoleküle
 Toxizität 460, 488
 Transferpressen 326
 Transmission 121
 Transmissions-Elektronenmikroskop 47
 Transparenz 121
 Treibhausgase 479
 Treibmittel 192, 328
 Trichteranguss *siehe* Angussystem
 Tunnelanguss *siehe* Angussystem
- U**
 Überlaufwerkzeug 325
 Ultraschall 162
 Ultraschallschweißen 362
 Umfangsfräsen 353
 Umformen 345
 Uneinheitlichkeit 24
 Ungesättigtes Formaldehydharz 260
 Ungesättigtes Polyesterharz 261
 Umformen 8, 56, 265
- V**
 Vakuum-Gießen 444
 Valenzelektron 28, 29
 Van-der-Waals-Kräfte 33
 Variotherme Werkzeugtemperierung 321
 - kovalente *siehe* Hauptvalenzbindung 29
 VARI-Verfahren 342
 Verarbeitung 69, 184, 388
 Verarbeitungstechnik 64, 265
 Verbindungsmoleküle 48
 Verbundspritzgießen 313
 Vergleichsspannung 426
 Verlustfaktor 95, 98, 130
 Verlustmodul 95
 Verner Panton 11
 vernetzende Kunststoffe *siehe* Duromer
 oder Elastomer
 Vernetzung 35, 36, 323, 329, 335
 Vernetzungsdichte 35
 Verschlussdüse 297
 Versprödung 200
 Verstärkungsstoffe 147
 Verstoffwechselung 467
 Verstreckgrad 349
 Verweilzeit
 - mittlere 181
 Verwertung
 - energetische 457, 472
 - stoffliche 457

- Verzug 409
 - Winkelverzug 409
 - Vibrationsrebschweißen
 - biaxial 364
 - linear 364
 - Visikosimeter *siehe* Rheometer
 - Ubbelohde- 26
 - Viskoelastizität 61, 89
 - viskos 60
 - Viskosimeter *siehe* Rheometer
 - Viskosität 56, 155, 166
 - Dehn- 87
 - Null- 76, 78
 - repräsentative 84
 - scheinbare 84
 - Scher- 72
 - Struktur- 73, 307
 - wahre 84
 - Volumen
 - freies 145
 - spezifisches 135
 - Vorformling 320
 - Vorstrecken 349
 - Vorstreckstempel 346
 - Vulkanisation 36, 326
 - Vulkapressen *siehe* Pressen
-
- W**
 - Wanddickenverteilung 347
 - Wandhaftung 71
 - Wärmeausdehnung 139, 388
 - Wärmeeindringzahl 142
 - Wärmekapazität
 - spezifische 132, 389
 - Wärmeleitfähigkeit 136, 389
 - Wärmeübertragung 357
 - Warmgas-Fächelschweißen 360
 - Wasserinjektionstechnik *siehe* Fluidinjektionstechnik
 - Wasserstoffbrückenbindung 31
 - Weichmacher 166, 463
 - Werkstoff 69
 - Werkstofftechnik 64, 69
 - Werkstoffvorauswahl 390
 - Werkzeug 265
 - Extrusions- 175, 266
 - offenes 348
 - Spritzgieß- 298
 - Werkzeugdruck 272
 - Werkzeuggegendruck *siehe* Werkzeugdruck
 - Werkzeugwiderstand 272
 - Widerstand, elektrischer 117
 - Wiederholungseinheit 18
-
- Z**
 - Zähigkeit 51, 52, 53
 - Zeitstandversuch 107
 - Zeit-Temperatur-Verschiebungsprinzip 109, 433
 - Zersetzungstemperatur 57
 - Zugfestigkeit 53, 387
 - Zugversuch 102
 - Zusatzstoffe 181, 461
 - aktive *siehe* Verstärkungsstoffe
 - Funktions- *siehe* Additive
 - inaktive *siehe* Füllstoffe
 - Zwangsentformung 422
 - Zwangsförderung 272
 - Zwischenfaserbruch 159
 - Zykluszeit 305, 358