



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](http://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](http://www.hanser-fachbuch.de)  
Herstellung: Kösel Media GmbH, Krugzell  
Coverconcept: Marc Müller-Bremer, [www.rebranding.de](http://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 bekräftigten 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 ermöglichten 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“, „Gifte 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

<b>Vorwort</b> .....	<b>V</b>
Vorwort zur 2. Auflage .....	V
Vorwort zur 1. Auflage .....	V
<b>Der Autor: Prof. Christian Bonten</b> .....	<b>IX</b>
<b>Hinweise zur Benutzung des Buches</b> .....	<b>XI</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>1</b>
1.1 Kunststoff – Werkstoff der Moderne .....	1
1.2 Einsatzgebiete von Kunststoffen .....	5
1.3 Kunststoffe und Design .....	8
1.4 Literaturverzeichnis .....	11
<b>2 Grundlagen</b> .....	<b>13</b>
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
<b>3</b>	<b>Kunststoff-Werkstofftechnik</b>	<b>69</b>
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	Dehnrheometer	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 $\rho$	135
3.2.3.4	Wärmeleitfähigkeit $\lambda$	136
3.2.3.5	Wärmeausdehnungskoeffizient $\alpha$	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	Alterungsursachen .....	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 Alterungstabilisatoren .....	199
3.6.3	Alterungserscheinungen .....	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
<b>5 Produktentwicklung mit Kunststoffen .....</b>	<b>385</b>
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
<b>6</b>	<b>Kunststoffe und Umwelt .....</b>	<b>455</b>
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 Abfassung 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**

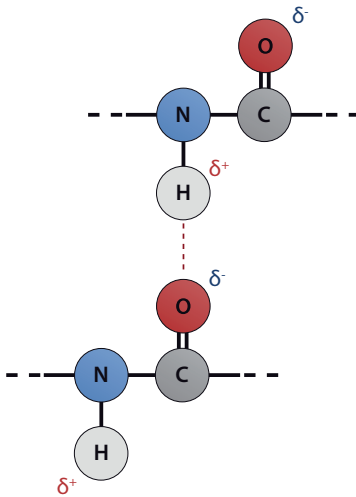


Bild 2.17 Wasserstoffbrückenbindungen

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  $\sim 20$  kJ/mol in die Größenordnung von schwachen Hauptvalenzbindungen. In Bild 2.18 sind Wasserstoffbrückenbindungen in Polyurethan (PUR) und Polyamid (PA) verdeutlicht.

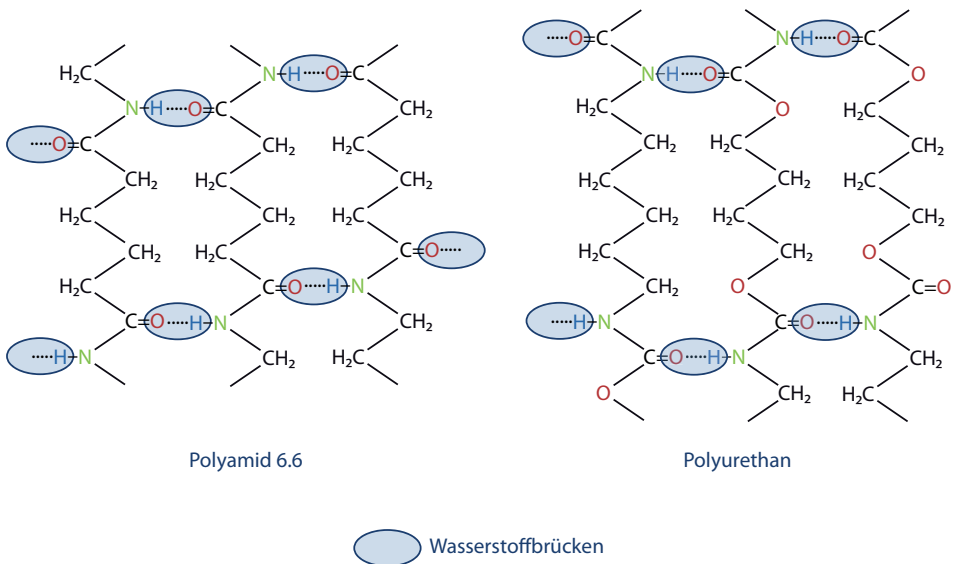


Bild 2.18 Wasserstoffbrückenbindungen am Beispiel von PA66 und PUR



### Induktionskräfte

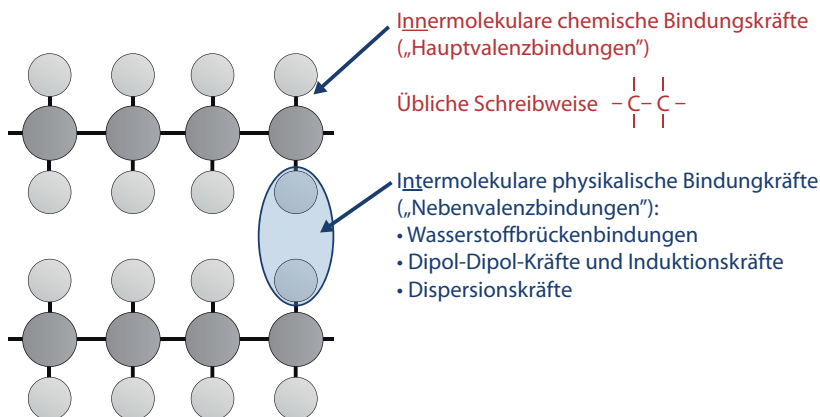
Sehr schwache Nebenvalenzbindungen sind die Induktionskräfte. Moleküle mit permanenten Dipolen können in benachbarten unpolaren Molekülen Elektronenverschiebungen hervorrufen und somit Dipolmomente induzieren. Die Bindungsenergie beträgt nur 1/500 bis 1/2000 einer Hauptvalenzbindung.

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.

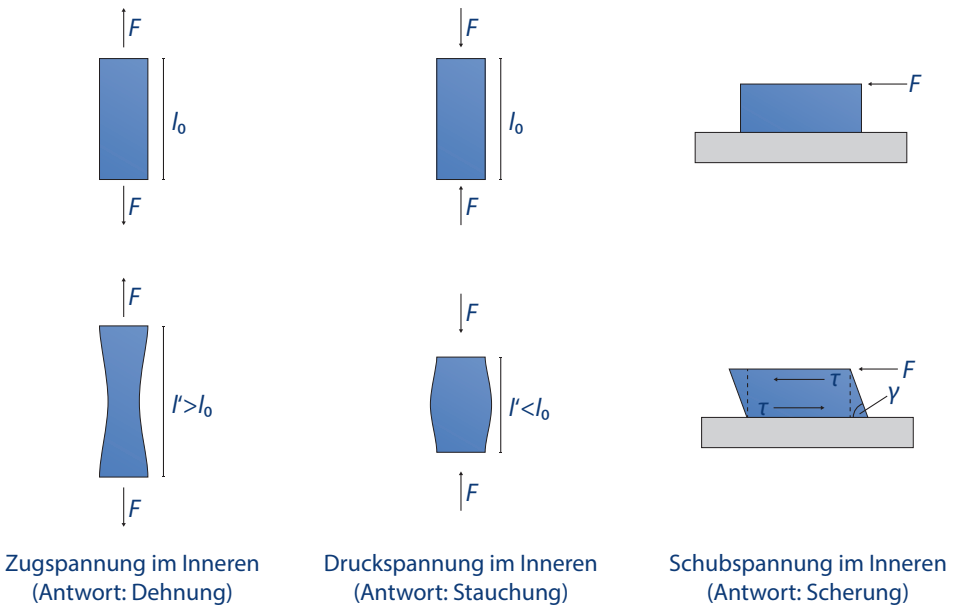
Zur Verdeutlichung sind in Bild 2.19 aneinandergereihte Kugeln als Atome dargestellt, die untereinander durch Hauptvalenzbindungen verbunden sind und Polymerketten bilden. Zwischen den Polymerketten bestehen Nebenvalenzkräfte verschiedener Art, je nach Atomen der Polymerkette.



**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.

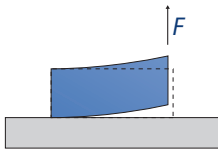
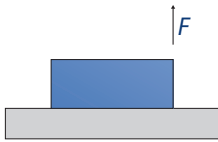
Die mechanische Beanspruchung von Festkörpern sowie Fluiden kann grundsätzlich durch Normalspannungen (Zug/Druck) und Schubspannungen beschrieben werden (Bild 2.40). Bestehen Zugspannungen, antwortet der Körper mit „Dehnung“. Bestehen Druckspannungen, nennt man die Antwort „Stauchung“. Bestehen Schubspannungen,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



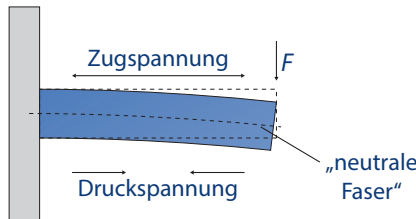
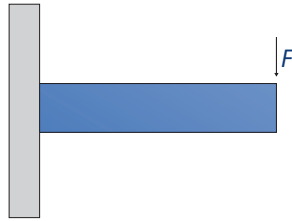
**Bild 2.40** Typische Beanspruchungen und deren Antworten

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.

## Schälbeanspruchung



## Biegebeanspruchung



## Torsionsbeanspruchung

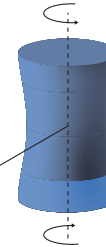
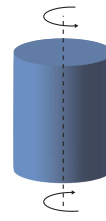


Bild 2.41 Überlagerte Beanspruchungen

## 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 spröde-steifen in einen elastisch-nachgiebigen („thermoelastischen“) Zustand über (Bild 2.42). Amorphe Thermoplaste gehen bei weiterer Temperaturerhöhung kontinuierlich in den plastisch-nachgiebigen („thermoelastischen“) Bereich über.

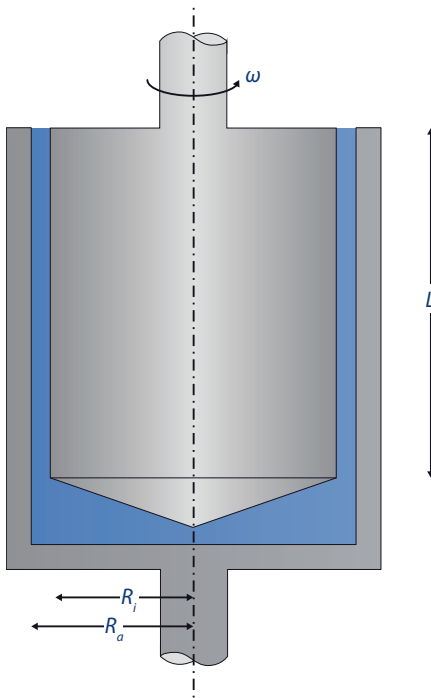


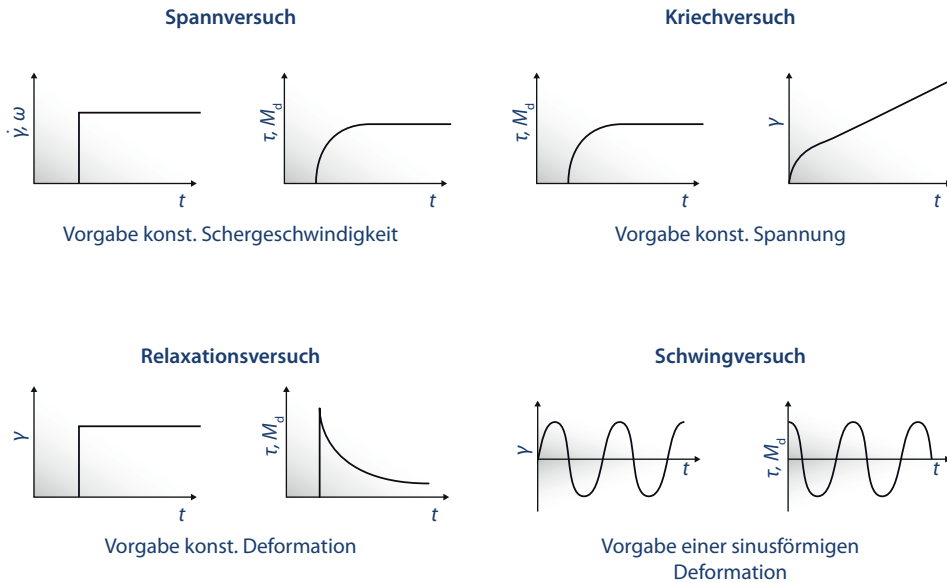
Bild 3.33 Das Couette-Rheometer

### Versuchsarten 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.

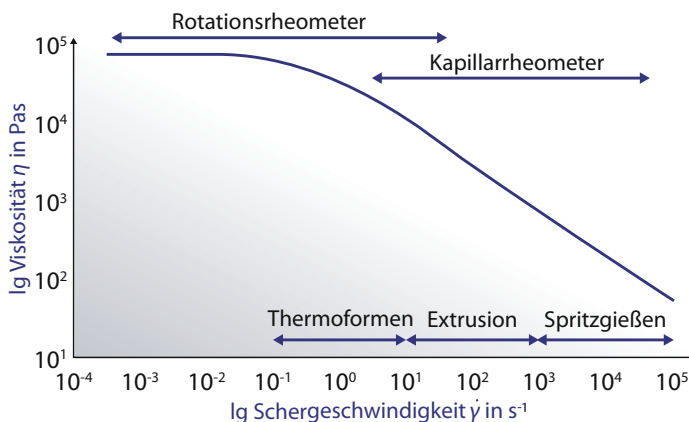
Mit einem Rotationsrheometer kann auch eine konstante Schubspannung aufgeprägt und die zunehmende Scherung aufgenommen werden. Dies wird als **Kriechversuch** bezeichnet. Andersherum kann im **Relaxationsversuch** eine konstante Deformation und damit Scherung induziert und die sich spontan einstellende 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  $0^\circ$  (rein elastisches Verhalten) und  $90^\circ$  (rein viskoses 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.



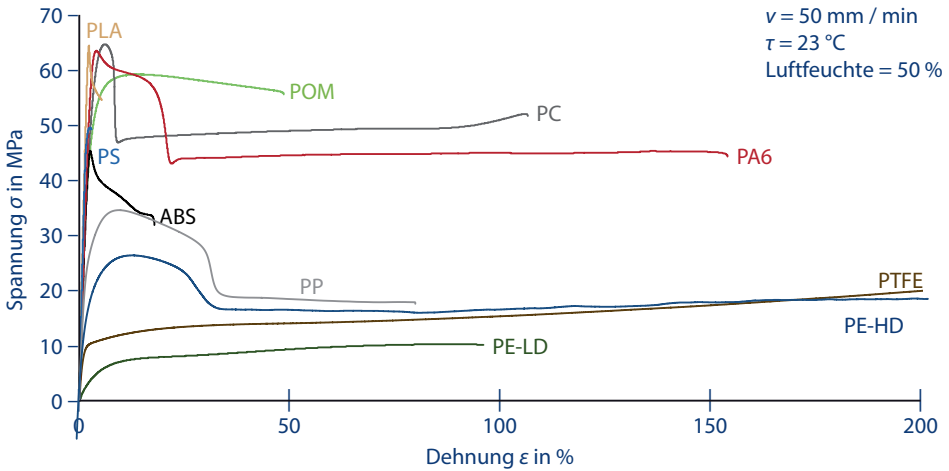
**Bild 3.34** Verschiedene Versuchsarten mit Rotationsrheometern

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 langsamen Fließprozessen beim Thermoformen, über die Extrusion, bis hin zum Spritzgießen mit sehr hohen Schergeschwindigkeiten.



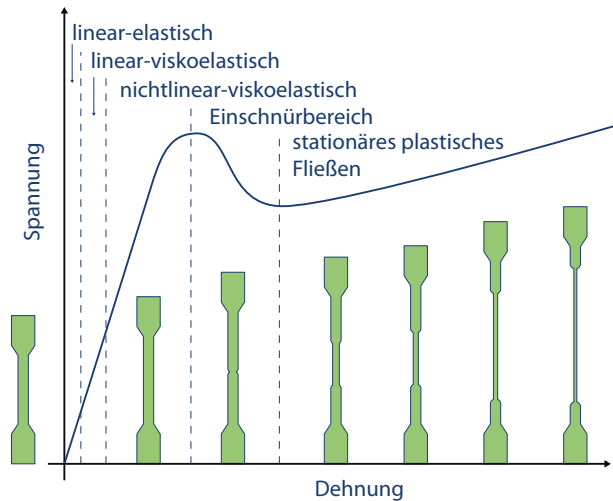
**Bild 3.35** Einsatzbereich der Kapillar- und Rotationsrheometer

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.



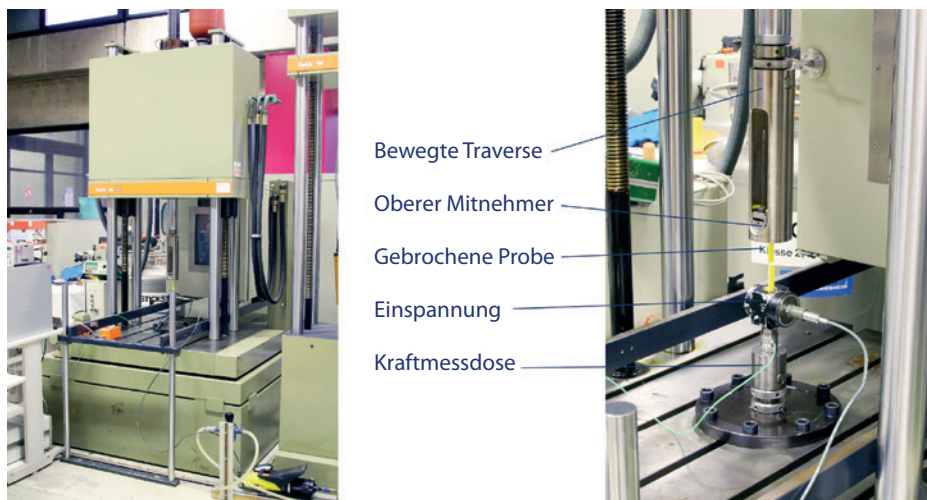
**Bild 3.41** Verformungsverhalten unter Last; nach [3]

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 Schnellzerreiversuch

Schnellzerreimaschinen ermöglichen Zugversuche bei sehr hohen Geschwindigkeiten. In Bild 3.42 ist die Schnellzerreimaschine des IKT mit Prüfgeschwindigkeiten von bis zu 20 m/s dargestellt. Im Hintergrund sieht man die hier zurückgefahrte 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** Schnellzerreimaschine 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]

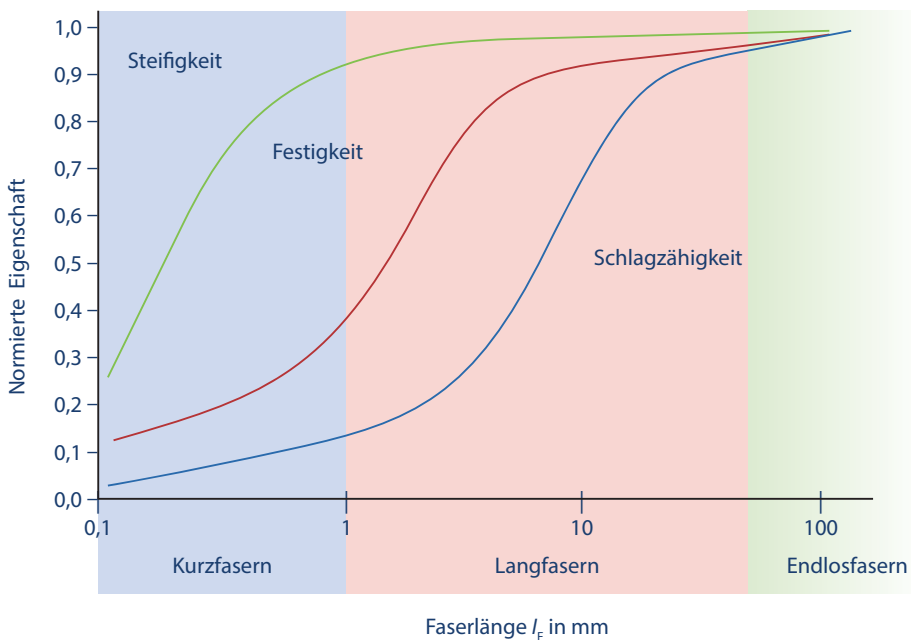


### 3.3.1.1 Die Fasern und das Prinzip der Verstärkung

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  $\mu\text{m}$ . 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.



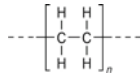
**Bild 3.98** Faserlängen beeinflussen die mechanischen Eigenschaften von Faserkunststoffverbunden [5]

## ■ 3.8 Polyethylen (PE)

teilkristalliner Standardthermoplast

### Kurzbeschreibung

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



### Verarbeitung

Polyethylene können 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 Benzintanks, 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

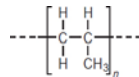
siehe Seite 211

## ■ 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.



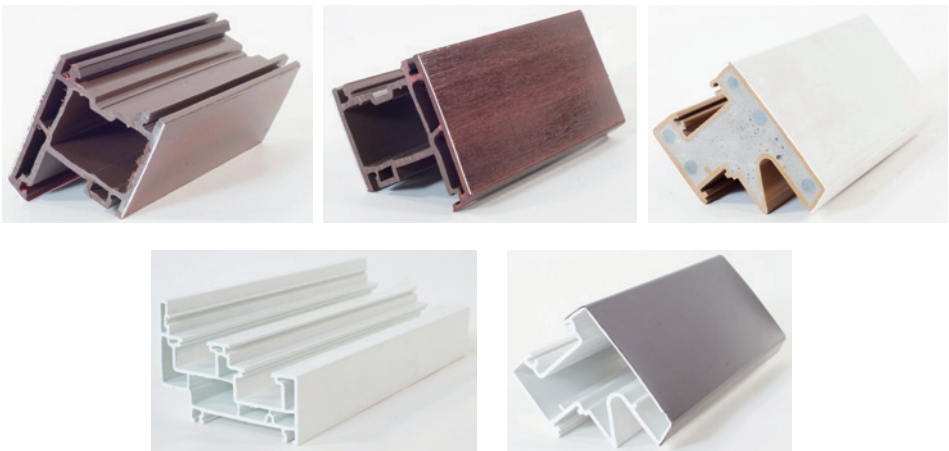
**Bild 4.19** Profilquerschnitte



#### QR-Code 4-4

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

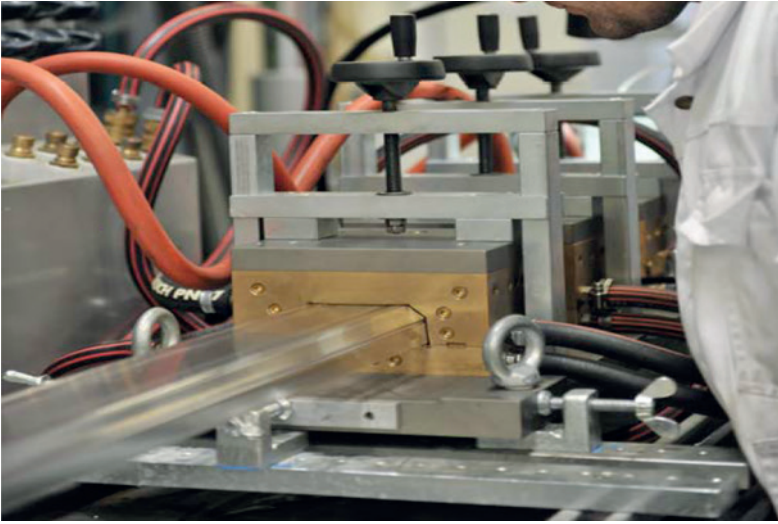
<http://www.ikt.uni-stuttgart.de/links/Videolinks/Profilextrusion>



**Bild 4.20** Fensterprofile

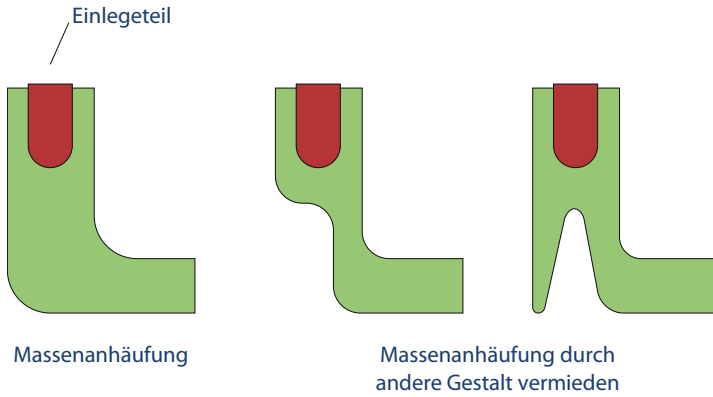
Der Werkzeugaustritt hat in der Regel nicht exakt dieselbe Form und dieselben Maße wie das spätere Profil (Bild 4.21). Form und Maße des Extrudatstrangs werden nach dem Austritt aus dem Werkzeug von mehreren Faktoren beeinflusst:

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



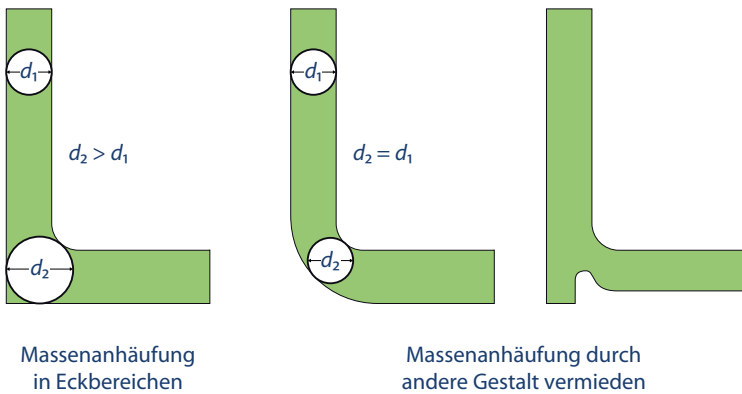
**Bild 4.21** Profilextrusion [Bildquelle: Technoform Kunststoffprofile GmbH]

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.



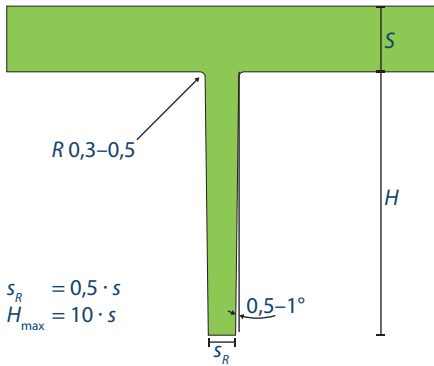
**Bild 5.34** Vermeidung von Massenanhäufungen

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 Inkreisradius 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  
Abstaeuelement 177  
Acrylester-Styrol-Acrylnitril 11  
Acrylnitril 462  
Acrylnitril-Butadienstyrol *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  
Austragszone 267, 270, 274

## B

Baekeland, L. H. 3  
Bagley-Korrektur 94  
Bakelit 3  
Barriereschicht 146, 288, 457  
Barriereschnecke 275  
Barrierewirkung 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  
Bindenaht 187, 357, 421  
Bindigkeit 29  
Bindung  
– kovalente *siehe* Hauptvalenzbindung  
– physikalische *siehe* Nebenvaleenzbindung  
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  
CO<sub>2</sub>-Fußabdruck 483  
CO<sub>2</sub>-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  
Dehnrheometer 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* Spritzgieß-  
compoundieren  
Dispersionskräfte 33  
Doppelschneckenextruder 168, 175  
– gegenläufig 175  
– gleichläufig 175, 178  
Doppelstegdornhalter *siehe* Stegdornhalter  
Drehen 355  
Drehteller 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  
Duomer 35, 58, 154, 323

Duroplast *siehe* Duomer  
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* Barrierschnecke
- Filmscharnier 372, 403, 424, 429
- Filtermodell 390
- Flächenträgheitsmoment 328, 405
- Flachfolienextrusion 283
- Flachfolienwerkzeug *siehe* Breitschlitzdüse
- Flammschutzmittel 463
- Flanke
  - aktive 273
  - passive 273
- Flechten 343
- FlieBaktivierungsenergie 81
- FlieBbehinderung *siehe* FlieBgrenze
- FlieBgrenze 83
- FlieBhilfsmittel 165
- FlieBmarkierung 279
- FlieBverhalten
  - Newton'sch 73
  - strukturviskos 73
- FlieBweg 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
- Glattrohretruder 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

**K**

Kaschieren *siehe* Beschichten  
 Kaskadenspritzgießen 311  
 Katalysator 18, 36  
 Kautschuk 326  
 Kavität 292, 298, 313, 335  
 Kegel-Platte-Rheometer *siehe* Rotations-  
 rheometer  
 Keimbildner 170  
 Keltool 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  
 Kristallitschmelztemperatur 56, 135  
 Kugelgelenkverbindung 371  
 Kühlkanal *siehe* Temperiersystem  
 Kühlzeit 293, 359, 420  
 Kunststoff 9, 63  
 – Hochleistungs- 205  
 – Massen- 204

– 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**

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  
 Massedurchsatz 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  
Nebervalenzbindung 30, 42  
Negativformung 346  
Nieten 374  
Normalspannung 54  
Nukleierungsmittel *siehe* Keimbildner  
Nutbuchenextruder 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  
Polyphenylsulfid 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  
 Regnault, H. V. 4  
 Reibeigenschaft 375  
 Reibklotz 61  
 Relaxation 111  
 Reptationsmodell 75  
 Resin Transfer Molding 341  
 Ressourcenschonung 480, 488  
 Retardation 111  
 Rheologie 70  
 Rheometer  
 – Dehnrheometer 100  
 – Hochdruck-Kapillarrheometer 93  
 – Rotationsrheometer 95  
 Rheometrie 91  
 Ringanguss *siehe* Angusssystem  
 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  
 – offenzellig 191  
 Scheibenanguss *siehe* Angusssystem  
 Schergeschwindigkeit 72  
 – Übergangsschergeschwindigkeit 78  
 Scherung 54, 187  
 Schichtsilikat 164  
 Schirmanguss *siehe* Angusssystem

Schlack, P. 5  
 Schlagbiegeversuch 115  
 Schlagpendel *siehe* Schlagbiegeversuch  
 Schlagzähigkeit 115  
 Schlagzähmodifizierer 168  
 Schlauchextrusion *siehe* Blasfolienextrusion  
 Schleifen 354  
 Schlepplströmung *siehe* eindimensionale Strömung  
 Schließeinheit 291, 297  
 Schmelzefilter 182  
 Schmelzefront 187  
 Schmelzeindex 92  
 Schmelzekanal 276 *siehe* Barriereschnecke  
 Schmelzemassefließrate 92  
 – mechanisches 59  
 Schnapphaken *siehe* Schnappverbindung  
 Schnappverbindung 371, 402  
 Schneckenpiel 268  
 Schneckenraum 295  
 Schnell, H. 5  
 Schnellzerreißversuch 105  
 Schraubdom 403, 418, 427  
 Schraubverbindungen 372  
 Schrumpf 90  
 Schubmodul 95  
 – elastischer *siehe* Speicherm modul  
 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  
 Speicherm modul 95, 166  
 Sphärolith 46, 170  
 Spritzgießcompoundieren 312  
 Spritzgießen 11, 289, 327

Spritzgießmaschine 291  
 Spritzgieß-Sondervverfahren 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  
 Strangaufweitung 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  
 Temporn 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  
 Thermoplastspritzgießen 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* Angusssystem  
 Tunnelanguss *siehe* Angusssystem

## U

Überlaufwerkzeug 325  
 Ultraschall 162  
 Ultraschallschweißen 362  
 Umfangsfräsen 353  
 Umformen 345  
 Uneinheitlichkeit 24  
 Ungesättigtes Formaldehydharz 260  
 Ungesättigtes Polyesterharz 261  
 Urformen 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* Duomer  
   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  
 Vibrationsreißschweißen  
 – biaxial 364  
 – linear 364  
 Viskosimeter *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