



## Leseprobe

Christian Hopmann, Walter Michaeli

Einführung in die Kunststoffverarbeitung

ISBN (Buch): 978-3-446-45355-5

ISBN (E-Book): 978-3-446-45356-2

Weitere Informationen oder Bestellungen unter

<http://www.hanser-fachbuch.de/978-3-446-45355-5>

sowie im Buchhandel.

# Vorwort zur achten Auflage

Die vorherige 7. Auflage hat sich erfreulicherweise sehr gut verkauft, so dass wir nur zwei Jahre später eine 8. Auflage dieses Buches herausbringen können.

Nach den umfangreicheren Überarbeitungen für die 7. Auflage umfasst die hier vorliegende 8. Auflage einige Verbesserungen und Aktualisierungen. Im Detail: Einzelne Darstellungen wurden inhaltlich erweitert und Bilder erneuert, so dass die Grundlagen der Kunststoffverarbeitung in Forschung und Praxis in weiterhin aktueller, umfassender und anschaulicher Weise abgebildet sind.

Auch dieses Mal gilt mein Dank meinen Mitarbeitern am Institut für Kunststoffverarbeitung, den Mitarbeitern beim Carl Hanser Verlag sowie den aufmerksamen Lesern, die uns auf Verbesserungsmöglichkeiten hingewiesen und so zum Gelingen dieser Überarbeitung beigetragen haben.

März 2017

*Christian Hopmann*

# Die Autoren

## **Univ.-Prof. Christian Hopmann**

Seit April 2011 ist Prof. Christian Hopmann Leiter des Instituts für Kunststoffverarbeitung (IKV) in Industrie und Handwerk an der RWTH Aachen. Er studierte Maschinenbau mit der Vertiefungsrichtung Kunststofftechnik an der RWTH Aachen und promovierte 2000 bei Prof. Walter Michaeli. 2005 wechselte Hopmann in die Industrie und trat bei der RKW AG Rheinische Kunststoffwerke (heute: RKW SE) ein. Von Januar 2010 bis zu seinem Wechsel an das IKV war er Managing Director der RKW Sweden AB in Helsingborg/Schweden. 2014 wurde er für die Entwicklung der Spaltimprägniertechnologie für faserverstärkte Kunststoffe mit dem NRW-Innovationspreis ausgezeichnet.

## **Prof. Walter Michaeli**

Prof. Walter Michaeli verabschiedete sich 2011 nach 23 überaus erfolgreichen Jahren als Institutsleiter am IKV und nach Erreichen der Altersgrenze in den Ruhestand. Michaeli studierte Fertigungstechnik an der RWTH Aachen, nach über acht Jahren Industrietätigkeit übernahm er 1988 als Direktor die Leitung des IKV. Er war Mitglied in mehreren bedeutenden wissenschaftlichen Akademien und in der Jury des Deutschen Zukunftspreises. Für seine Entwicklung einer innovativen Wasserinjektionstechnik beim Spritzgießen von Kunststoffen erhielt Professor Michaeli im Jahr 2002 den Otto von Guericke-Preis der AiF.

# Inhalt

<b>Vorwort zur achten Auflage</b> .....	<b>V</b>
Vorwort zur siebten Auflage .....	VII
Vorwort zur sechsten Auflage .....	VIII
Vorwort zur fünften Auflage .....	VIII
Vorwort zur vierten Auflage .....	IX
Vorwort zur dritten Auflage .....	IX
<b>Die Autoren</b> .....	<b>XI</b>
<b>Kurzzeichen für Polymere</b> .....	<b>XIII</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>1</b>
Literatur .....	2
<b>2 Aufbau und Einteilung der Kunststoffe</b> .....	<b>3</b>
2.1 Aufbau der Kunststoffe .....	3
2.1.1 Herstellung von Kunststoffen .....	4
2.1.1.1 Polymerisation .....	4
2.1.1.2 Polykondensation .....	11
2.1.1.3 Polyaddition .....	12
2.1.2 Bindungskräfte in Polymeren .....	14
2.2 Einteilung der Kunststoffe .....	16
2.2.1 Thermoplaste .....	17
2.2.2 Duroplaste und Elastomere .....	20
2.2.3 Copolymere und Polymergemische .....	22
2.2.4 Zuschlagstoffe .....	23
2.3 Biopolymere .....	24
Literatur .....	26

<b>3</b>	<b>Physikalische Eigenschaften der Kunststoffe</b>	<b>27</b>
3.1	Thermische Werkstoffeigenschaften	27
3.1.1	Dichte	27
3.1.2	Thermische Ausdehnung	29
3.1.3	Wärmeleitfähigkeit	30
3.1.4	Spezifische Wärmekapazität	31
3.2	Fließeigenschaften von Polymerschmelzen	34
3.2.1	Newtonsche und nicht-newtonsche Fluide	35
3.2.2	Ansätze zur Beschreibung des strukturviskosen Fließverhaltens der Schmelze	37
3.2.2.1	Potenzansatz nach Ostwald und de Waele	37
3.2.2.2	Carreau-Ansatz	39
3.2.3	Einfluss der Temperatur auf das Fließverhalten	39
3.2.4	Messung viskoser Fließeigenschaften	41
3.2.4.1	Kapillarrheometer	42
3.2.4.2	Rotationsrheometer	46
3.2.4.3	Schmelzindexmessung	47
3.3	Elastische Eigenschaften von Polymerschmelzen	49
3.3.1	Normalspannungen	50
3.3.2	Zeitabhängiges Verhalten	50
3.4	Abkühlen aus der Schmelze	50
3.4.1	Amorph erstarrende Thermoplaste	51
3.4.2	Teilkristallin erstarrende Thermoplaste	51
3.4.3	Nukleierung	54
3.4.4	Bestimmung des Kristallisationsgrades	55
3.5	Morphologie erstarrter Thermoplaste	56
3.5.1	Amorph erstarrte Thermoplaste	57
3.5.2	Teilkristallin erstarrte Thermoplaste	59
	Literatur	61
<b>4</b>	<b>Werkstoffkunde der Kunststoffe</b>	<b>63</b>
4.1	Allgemeines zum Werkstoffverhalten	63
4.2	Spannungs-Dehnungs-Verhalten	66
4.2.1	Kurzzeit-Verhalten	66
4.2.2	Stoßartige Beanspruchung	68
4.2.3	Verhalten bei langzeitiger und ruhender Beanspruchung	69
4.2.4	Schwingende Beanspruchung	71
4.3	Eindruck-, Verschleiß- und Reibverhalten	72
4.3.1	Härte	72
4.3.2	Abrieb	75
4.3.3	Reibverhalten	75
4.4	Elektrisches Verhalten	76
4.4.1	Dielektrisches Verhalten	76
4.4.2	Elektrische Leitfähigkeit	78

4.4.3	Durchschlagfestigkeit .....	78
4.4.4	Elektrostatische Aufladung .....	79
4.5	Optisches Verhalten .....	80
4.5.1	Brechung und Dispersion .....	80
4.5.2	Transparenz .....	80
4.5.3	Glanz .....	81
4.5.4	Farbe .....	81
4.6	Akustisches Verhalten .....	83
4.7	Verhalten gegen Umwelteinflüsse .....	85
4.7.1	Widerstandsfähigkeit gegen Medien .....	85
4.7.2	Spannungsrissbeständigkeit .....	87
4.7.3	Diffusion und Permeation .....	88
4.7.4	Bewitterung .....	89
4.7.5	Biologisches Verhalten .....	90
4.7.6	Brandverhalten .....	90
4.8	Gebrauchstauglichkeit und Qualitätssicherung .....	91
	Literatur .....	92
<b>5</b>	<b>Aufbereitung von Kunststoffen .....</b>	<b>99</b>
5.1	Einleitung .....	99
5.2	Aufgaben in der Aufbereitung .....	99
5.2.1	Lagern und Fördern .....	100
5.2.2	Dosieren .....	100
5.2.3	Mischen .....	102
5.2.3.1	Diskontinuierliche Aufbereitungsmaschinen .....	102
5.2.3.2	Kontinuierliche Aufbereitungsmaschinen .....	104
5.2.4	Granulieren .....	107
5.3	Zuschlagstoffe .....	107
5.3.1	Verarbeitungshilfsmittel .....	107
5.3.2	Stabilisatoren .....	108
5.3.3	Antistatika .....	108
5.3.4	Elektrisch leitfähige Füllstoffe .....	109
5.3.5	Flammschutzmittel .....	109
5.3.6	Treibmittel .....	109
5.3.7	Festigkeit und Steifigkeit herabsetzende Zuschlagstoffe .....	109
5.3.8	Festigkeit und Steifigkeit erhöhende Zuschlagstoffe .....	110
	Literatur .....	110
<b>6</b>	<b>Verarbeitungsverfahren für Kunststoffe .....</b>	<b>111</b>
6.1	Extrusion .....	111
6.1.1	Der Extruder .....	112
6.1.1.1	Der Einschneckenextruder .....	113
6.1.1.2	Die Schnecke .....	116
6.1.1.3	Konventionelle Einschneckenplastifizierextruder .....	118

6.1.1.4	Der fördersteife Einschneckenextruder .....	120
6.1.1.5	Der Plastifiziervorgang im Einschneckenextruder .....	121
6.1.1.6	Der Doppelschneckenextruder .....	123
6.1.1.7	Extruderzylinder .....	125
6.1.2	Weitere Anlagenkomponenten .....	126
6.1.2.1	Extrusionswerkzeug .....	126
6.1.2.2	Kalibrierung/Kühlung und Abzug .....	129
6.1.2.3	Anlagenbeispiele .....	130
6.1.3	Coextrusion .....	131
6.2	Extrusionsblasformen und Streckblasen .....	132
6.2.1	Extrusionsblasformen .....	133
6.2.1.1	Der Verfahrensablauf .....	133
6.2.1.2	Die Maschine .....	135
6.2.1.3	Das Mehrfachblasformen .....	140
6.2.1.4	Coextrusionsblasformen .....	140
6.2.1.5	3D-Blasformen .....	141
6.2.1.6	Saugblasen .....	141
6.2.2	Streckblasen .....	142
6.2.2.1	Vorformlingsherstellung .....	143
6.2.2.2	Verfahren aus erster und zweiter Wärme .....	143
6.2.2.3	Vor- und Nachteile des Streckblasverfahrens .....	144
6.3	Spritzgießen .....	144
6.3.1	Maschine und Verfahrensablauf .....	144
6.3.1.1	Verfahrensablauf .....	145
6.3.1.2	Maschinenaufbau .....	146
6.3.1.3	Kenndaten der Maschine .....	148
6.3.2	Baugruppen .....	149
6.3.2.1	Plastifiziereinheit .....	149
6.3.2.2	Schließeinheit .....	157
6.3.2.3	Werkzeug .....	160
6.3.2.4	Werkzeugtemperierung .....	164
6.3.2.5	Maschinenbett und Steuereinheit .....	165
6.3.3	Sonderverfahren .....	165
6.3.3.1	Thermoplast-Schaumspritzgießen (TSG) .....	166
6.3.3.2	Mehrkomponenten-Spritzgießen .....	169
6.3.3.3	Kaskadenspritzgießen .....	172
6.3.3.4	Spritzprägen .....	173
6.3.3.5	Hinterspritztechnik .....	175
6.3.3.6	Schmelzkerntechnik .....	176
6.4	Herstellung von Formteilen aus duroplastischen Pressmassen .....	176
6.4.1	Der Werkstoff „Duroplastische Pressmasse“ .....	176
6.4.2	Das Pressverfahren .....	178
6.4.3	Verfahrensvarianten .....	181
6.5	Elastomerverarbeitung .....	182
6.5.1	Rohstoffe und Mischungen .....	183
6.5.1.1	Kautschukpolymere .....	183

6.5.1.2	Verstärkende Füllstoffe .....	184
6.5.1.3	Vernetzungssystem .....	185
6.5.2	Mischungsherstellung .....	186
6.5.3	Formgebung von Elastomeren .....	187
6.5.3.1	Extrusion und kontinuierliche Vulkanisation von Elastomeren .....	187
6.5.3.2	Herstellung elastomerer Formteile .....	190
6.6	Verarbeitung von Polyurethanen .....	192
6.6.1	Schaumbildungsprozess .....	194
6.6.2	Anlagentechnik zur Verarbeitung reaktiver Polyurethane .....	195
6.6.3	RIM-Verfahren .....	199
6.7	Faserverstärkte Kunststoffe .....	200
6.7.1	Materialien .....	202
6.7.2	Bauteilkonstruktion und -auslegung .....	205
6.7.3	Verarbeitungsverfahren für Faserverbundkunststoffe .....	206
6.7.3.1	Handlaminierverfahren .....	207
6.7.3.2	Faserspritzen .....	208
6.7.3.3	Prepregverarbeitung, Tapelegen, Autoklavieren .....	209
6.7.3.4	Faserwickeln .....	209
6.7.3.5	Pultrusionsverfahren .....	211
6.7.3.6	Harzinjektionsverfahren (Resin Transfer Moulding, RTM) .....	212
6.7.3.7	Harzinfusionsverfahren (Resin Infusion, RI) .....	214
6.7.3.8	Spaltimprägnierverfahren .....	215
6.7.3.9	Umformen endlosfaserverstärkter Thermoplaste .....	217
6.7.3.10	Pressen langfaserverstärkter Kunststoffe .....	220
6.7.4	Prozesssimulation bei der Pressverarbeitung .....	227
6.8	Kalandrieren .....	228
6.9	Verarbeitung durch Gießen .....	233
6.9.1	Gießen .....	234
6.9.2	Schüttsintern .....	235
6.9.3	Schleudergießen (Rotationsformen) .....	236
6.9.4	Foliengießen .....	237
6.9.5	Umgießen .....	237
6.9.6	Imprägnieren .....	237
	Literatur .....	238
<b>7</b>	<b>Weiterverarbeitungstechniken für Kunststoffe .....</b>	<b>247</b>
7.1	Thermoformen .....	247
7.1.1	Maschinen .....	248
7.1.2	Verfahrensschritte .....	250
7.2	Schweißen von Kunststoffen .....	255
7.2.1	Heizelementschweißen (HE-Schweißen) .....	259
7.2.1.1	Direkte Heizelement-Schweißverfahren .....	259
7.2.1.2	Indirekte HE-Schweißverfahren .....	263



7.2.2	Wargasschweißen	264
7.2.2.1	Fächelschweißen (Runddüse)	265
7.2.2.2	Ziehschweißen (Schnellschweißen)	265
7.2.2.3	Wargas-Überlappschweißen	265
7.2.2.4	Extrusionsschweißen	266
7.2.2.5	Heißgasschweißen	266
7.2.3	Reibschweißverfahren	267
7.2.3.1	Verfahren mit äußerer Reibung	267
7.2.3.2	Verfahren mit innerer Reibung	268
7.2.4	Strahlungsschweißverfahren	270
7.2.4.1	Heizelementstrahlungsschweißen	270
7.2.4.2	Infrarotschweißen	271
7.2.4.3	Laserstrahlschweißen	271
7.2.4.4	Laserdurchstrahlschweißen	271
7.2.5	Induktionsschweißen (Elektromagnetisches Schweißen)	274
7.3	Kleben von Kunststoffen	274
7.3.1	Mechanismus der Klebung	275
7.3.2	Einteilung der Klebstoffe	276
7.3.2.1	Physikalisch abbindende Klebstoffe	277
7.3.2.2	Chemisch abbindende Klebstoffe (Reaktionsklebstoffe)	277
7.3.3	Werkstoffeinflüsse auf die Klebbarkeit von Kunststoffen	278
7.3.4	Verfahrensablauf beim Kleben	279
7.4	Mechanische Bearbeitung	281
7.4.1	Sägen	282
7.4.2	Fräsen	284
7.4.3	Schleifen und Polieren	285
7.4.4	Bohren	286
7.4.5	Drehen	288
	Literatur	290
<b>8</b>	<b>Recycling von Kunststoffen</b>	<b>293</b>
8.1	Einleitung	293
8.2	Aufbereitung von Kunststoffabfällen	297
8.3	Werkstoffliche Verwertung von Kunststoffabfällen	299
8.4	Rohstoffliche Verwertung	302
8.5	Energetische Verwertung	304
8.6	Abschließende Bemerkungen	305
	Literatur	305
	<b>Index</b>	<b>309</b>

lung von Naturprodukten entstehen. Sie sind in der Regel bei der Verarbeitung unter bestimmten Bedingungen (Wärme, Druck) plastisch formbar oder sind plastisch geformt worden“.

Diese makromolekularen Verbindungen werden Polymere genannt. Innerhalb eines Makromoleküls und somit einer Polymerkette liegt eine niedermolekulare Einheit vor, welche sich vielfach wiederholt aneinanderreihet und somit ein Makromolekül bildet. Je mehr dieser Wiederholungseinheiten verknüpft sind, desto länger ist die resultierende Polymerkette. Die Art (struktureller Aufbau) der Wiederholungseinheit und dessen Anzahl (durchschnittliche Kettenlänge) innerhalb eines Polymers legen chemische und physikalische Eigenschaften fest. Durch zugeführte Zusätze (Additivierung) können die Eigenschaften beeinflusst und somit angepasst bzw. optimiert werden. Das resultierende Produkt aus dem Polymer und seiner Additivierung wird als Kunststoff bezeichnet.

Anstelle von „Kunststoff“ findet man vor allem in älterer Literatur ebenso wie im allgemeinen Sprachgebrauch auch die Bezeichnung „Plastik“ oder „Plaste“ (von lat. „plasticus“ mit der Bedeutung weich, verformbar, elastisch). Plaste war ein in der ehemaligen DDR offiziell eingeführter Begriff für Kunststoffe.

## 2.1.1 Herstellung von Kunststoffen

Ein Kunststoff entsteht durch die Additivierung des zuvor gefertigten Polymers indem beispielsweise Stabilisatoren, Zuschlagstoffe, Weichmacher oder Flamm- schutzmittel sowie Zusätze in Form von Pigmenten und Füllstoffen zugefügt werden (vgl. hierzu Kapitel 5).

Die Herstellung von Polymeren basiert grundsätzlich auf drei zu unterscheidenden Reaktionsvorgängen:

- Polymerisation,
- Polykondensation und
- Polyaddition.

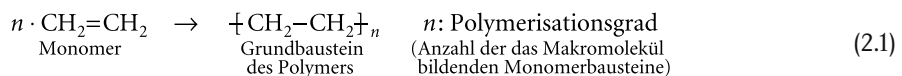
Die niedermolekularen Ausgangsmoleküle bezeichnet man bei allen Reaktionsvor- gängen als *Monomere*.

### 2.1.1.1 Polymerisation

Monomere als Grundbausteine

Unter dem Begriff Polymerisation versteht man eine *Kettenreaktion*, bei der unge- sättigte Moleküle zu Makromolekülen (Polymeren) verknüpft werden. Es bilden sich hierbei keine Reaktionsnebenprodukte.

Im Fall der Polymerisation besitzen die Monomere aufspaltbare Doppel- bzw. Drei- fachbindungen. Nach erfolgter Reaktion stellen sie die Basis für die sich wieder- holende Einheit dar und bilden somit den Grundbaustein eines Polymers. Als ein- faches Beispiel ist die Entstehung von Polyethylen aufgezeigt:



Die Anzahl  $n$  der Grundbausteine, die eine Molekülkette bilden, nennt man auch Polymerisationsgrad. Die Gesamtheit der entstehenden Makromoleküle und somit der Polymerketten stellt das Polymer dar.

Der Ausdruck „Kettenreaktion“ hat nichts damit zu tun, dass in diesem Falle Molekülketten entstehen. Er bezeichnet vielmehr die Kinetik und somit das zeitliche Voranschreiten einer Reaktion, die aus drei zeitlich aufeinanderfolgenden Phasen bzw. Reaktionsteilschritten besteht:

- Startreaktion,
- Kettenwachstumsreaktion und
- Abbruchreaktion.

Je nach Art der reaktionsfähigen Teilchen, die die Polymerisation der Monomere auslösen, unterscheidet man die folgenden Polymerisationsarten voneinander:

- radikalische Polymerisation,
- ionische Polymerisation (kationisch oder anionisch) und
- Polymerisation mit Übergangsmetallverbindungen.

Die Reaktionsteilschritte für die Polymerisation mit Übergangsmetallverbindungen können nicht ohne Einschränkung formuliert werden, da es bis heute noch nicht gelungen ist, den Reaktionsablauf dieser Polymerisationsart restlos aufzuklären.

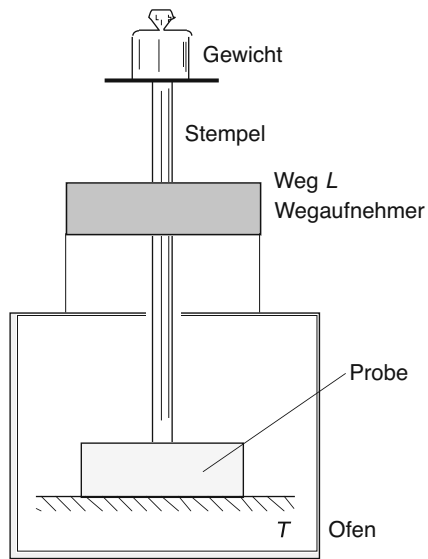
#### 2.1.1.1.1 Radikalische Polymerisation

Zum Start der Polymerisation zerfallen sogenannte Initiatoren durch Energiezufuhr in sehr reaktionsfähige Radikale ( $I^*$ ), die dann mit den Monomeren ( $M$ ) reagieren. Eine typische Initiatorklasse sind Peroxide wie beispielsweise Wasserstoffperoxid ( $H_2O_2$ ) oder Dibenzoylperoxid.

Initiatoren bilden Radikale

Reaktionsablauf (Bild 2.1):

1. Startreaktion, d. h. die Initiatoren ( $I$ ) zerfallen in ihre Radikale ( $I^*$ ) durch Energiezufuhr.
2. Kettenwachstumsreaktion:
  - a) Die Radikale reagieren nun mit einem doppelt gebundenen Kohlenstoffatom eines Monomers ( $M$ ; in diesem Fall Ethen:  $H_2C=CH_2$ ). Es resultieren eine Bindung zwischen dem Initiatorfragment und dem Kohlenstoffatom sowie ein Radikal am anderen Kohlenstoffatom der Doppelbindung.
  - b) Die neue reaktive Gruppe (Position des Radikals) reagiert Schritt für Schritt mit weiteren Doppelbindungen, wobei stets die Position des Radikals um einen Grundbaustein verschoben wird. Dies führt zu einer Verlängerung der Polymerkette. Da diese Art von Wachstum sehr schnell abläuft, spricht man von einer Kettenreaktion.
3. Abbruch, d. h. die Polymerisation kommt zum Stillstand durch:
  - a) Reaktion zweier Radikal-Enden von zwei Polymerketten unter Bildung einer Kohlenstoff-Kohlenstoff-Einfachbindung (Kombination). Es resultiert eine zu diesem Zeitpunkt vergleichsweise lange Kette mit vielen Wiederholungseinheiten (Grundbausteinen).



**Bild 3.2**  
Prinzip der TMA (Thermomechanische Analyse)

### 3.1.3 Wärmeleitfähigkeit

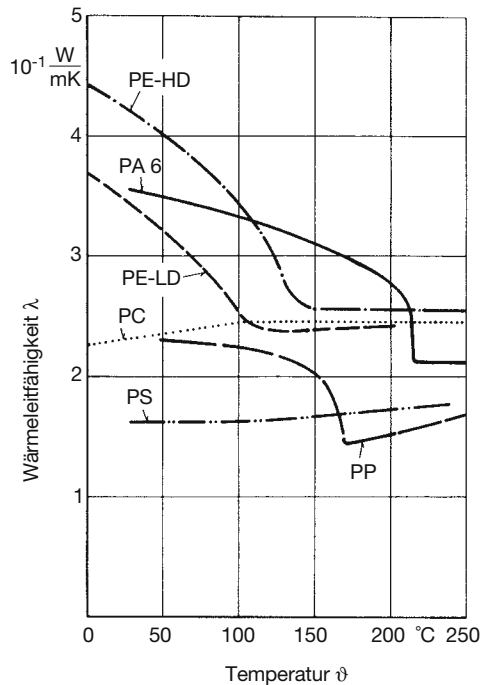
**gute Isolatoren** Wie alle *Isolatoren* leiten auch Kunststoffe die Wärme nur schlecht. Bei Metallen sorgen die frei beweglichen Elektronen nicht nur für eine hohe elektrische Leitfähigkeit, sondern auch für eine gute Wärmeleitfähigkeit. Bei Kunststoffen, die zu den elektrischen Nichtleitern oder Isolatoren gehören, fehlen jedoch diese frei beweglichen Elektronen für den Wärmetransport. Wärme kann bei Kunststoffen vorzugsweise entlang der Molekülketten transportiert werden, was deutlich langsamer vonstattengeht.

Diese „isolierende“ Eigenschaft ermöglicht den Einsatz von Kunststoffen in vielen Anwendungsbereichen (z. B. Behälter für kalte und warme Flüssigkeiten), bereitet aber auf der anderen Seite Schwierigkeiten bei ihrer Verarbeitung, da die für die Verarbeitung notwendige Wärme nur langsam eingebracht bzw. am Ende der Verarbeitung wieder herausgeholt werden kann.

**Schäume** Die *Wärmeleitfähigkeit*  $\lambda$  von Kunststoffen ist etwa dreihundert- bis tausendmal kleiner als die von Metallen. Luft leitet die Wärme noch etwa 10-mal schlechter, so dass geschäumte Kunststoffe ein noch besseres Isoliervermögen besitzen und deshalb auch als *Wärmedämmmaterial* eingesetzt werden. Auf der anderen Seite kann die Wärmeleitfähigkeit von Kunststoffen durch Zugabe von metallischen Füllstoffen um ein Vielfaches gesteigert werden.

**Temperaturabhängigkeit** Die Wärmeleitfähigkeit bewegt sich für reine Kunststoffe im Bereich von  $0,15 \text{ W}/(\text{mK}) \leq \lambda \leq 0,5 \text{ W}/(\text{mK})$  (Bild 3.3). Die Temperatur beeinflusst die Wärmeleitfähigkeit bei amorphen Thermoplasten kaum. Bei teilkristallinen Thermoplasten hingegen sinkt die Wärmeleitfähigkeit bis zum Schmelzpunkt mit zunehmender Temperatur. Am Schmelzpunkt fällt die Leitfähigkeit deutlich ab, weil hier die kristallinen Bereiche, die die Wärme besser leiten als die amorphen, aufgeschmolzen werden.

Oberhalb der Schmelztemperatur ist eine Temperaturabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit in der Regel nicht mehr vorhanden; eine Kunststoffschmelze besitzt also eine von der Temperatur nahezu unabhängige Wärmeleitfähigkeit.



**Bild 3.3**  
Wärmeleitfähigkeit verschiedener Thermoplaste

### 3.1.4 Spezifische Wärmekapazität

Die spezifische Wärme ist der Quotient aus zugeführter Wärmeenergie und Temperaturerhöhung. Anschaulich betrachtet beschreibt sie, wieviel Energie je Masseneinheit benötigt wird, um eine beabsichtigte Temperaturerhöhung zu erreichen. Bei ungefüllten Kunststoffen liegt die spezifische Wärmekapazität  $c_p$  im Bereich von  $0,4 \text{ kJ}/(\text{kgK}) \leq c_p \leq 2,7 \text{ kJ}/(\text{kgK})$  (Bild 3.4). Amorphe Thermoplaste zeigen eine mit der Temperatur kontinuierlich ansteigende spezifische Wärmekapazität. Bei teilkristallinen Thermoplasten hingegen findet bei der Kristallitschmelztemperatur ein Phasenübergang statt. Zugeführte Wärmeenergie wird genutzt, um die Kristallite aufzuschmelzen. Währenddessen erhöht sich die Temperatur jedoch nicht.

Thermoplaste

Duroplaste ändern ihre spezifische Wärmekapazität beim *Aushärten* sehr deutlich. Während der Aushärtung wird Wärme frei, die zu einer Senkung der spezifischen Wärmekapazität führt. Bei einem ausgehärteten Duroplasten steigt die spezifische Wärme monoton kontinuierlich mit der Temperatur an, da in einem ausgehärteten Duroplasten auch bei höherer Temperatur keine chemische Reaktion stattfindet. Einziges Merkmal des Kurvenverlaufs ist die Glasübergangstemperatur, die mit zunehmendem Aushärtungsgrad gegen einen Grenzwert wächst.

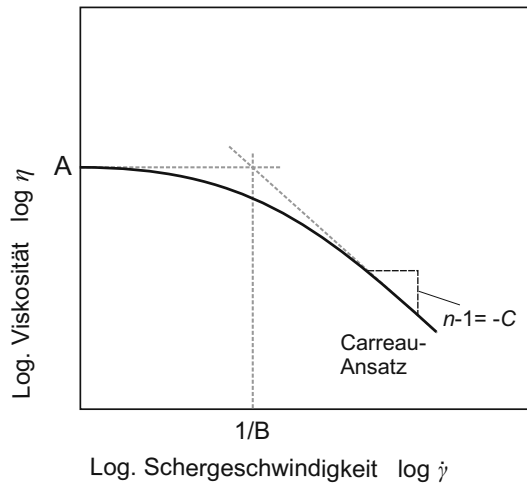
Duroplaste

### 3.2.2.2 Carreau-Ansatz

Der *Carreau-Ansatz* beschreibt den Verlauf der Viskositätskurve mit einem Drei-Parameter-Modell der Form: Drei-Parameter-Modell

$$\eta = \frac{A}{(1 + B\dot{\gamma})^C} \quad (3.12)$$

Hierbei beschreiben  $A$  die Nullviskosität,  $B$  die sogenannte reziproke Übergangsgeschwindigkeit und  $C$  die Steigung der Viskositätskurve im strukturviskosen Bereich (Bild 3.11).



**Bild 3.11** Beschreibung einer Viskositätskurve mit dem Carreau-Modell

Dieses Modell hat den Vorteil, dass es das tatsächliche Stoffverhalten innerhalb eines breiteren Schergeschwindigkeitsbereiches als der Potenzansatz richtig wiedergibt, und dass es auch für  $\dot{\gamma} \rightarrow 0$  sinnvolle Viskositätswerte liefert. Die Koeffizienten  $A$ ,  $B$  und  $C$  können nur durch eine Regressionsrechnung aus Messdaten ermittelt werden. Der Aufwand ist damit höher als beim Potenzansatz, bei dem man leicht graphisch anhand einer Ausgleichsgeraden die Parameter bestimmen kann.

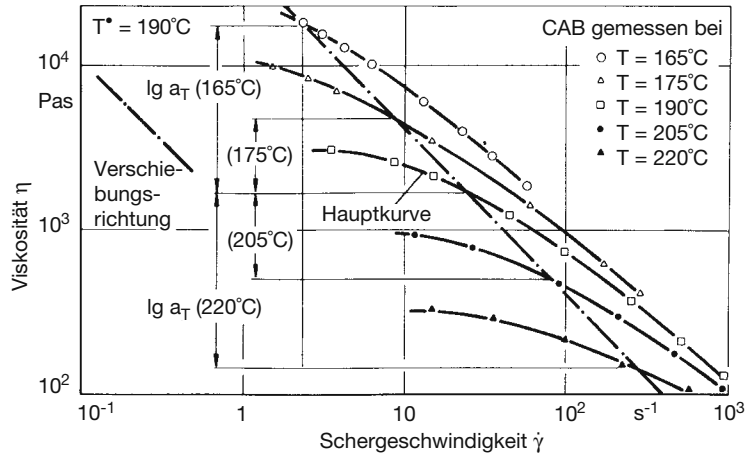
breiterer  
Gültigkeitsbereich

### 3.2.3 Einfluss der Temperatur auf das Fließverhalten

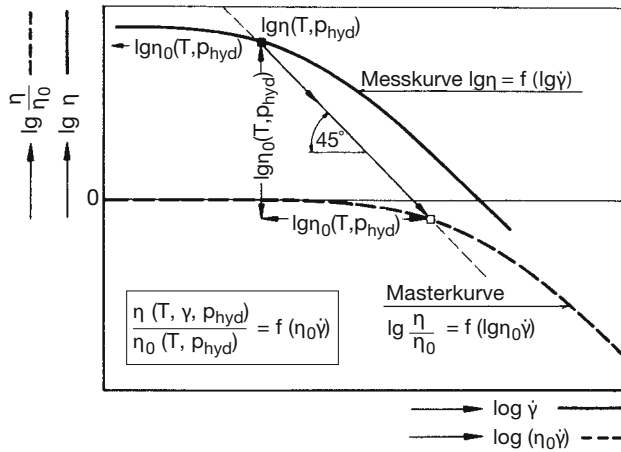
Das Fließverhalten von Polymerschmelzen ist nicht nur von der Schergeschwindigkeit, sondern auch von der Temperatur  $T$  und (in geringerem Maße) vom hydrostatischen Druck  $p$  abhängig. (Auf die Druckabhängigkeit der Viskosität soll wegen ihrer in der Praxis meist geringen Bedeutung nicht eingegangen werden.) Die starke Abhängigkeit der Viskosität von der Temperatur ist offensichtlich in Bild 3.12 zu erkennen. In einer doppeltlogarithmischen Auftragung zeigen aber die

Masterkurve

Verläufe der Viskositätskurven bei unterschiedlichen Temperaturen eine große Ähnlichkeit im grundsätzlichen Kurvenverlauf. Die Kurven lassen sich ineinander überführen, wenn man sie längs einer Geraden mit der Steigung  $-1$  verschiebt (*Temperaturverschiebungsprinzip*). Alle Kurven lassen sich so in einer sogenannten Masterkurve zusammenführen. Die Masterkurve ist unabhängig von der Temperatur (Bild 3.13).



**Bild 3.12** Viskositätsfunktionen bei verschiedenen Temperaturen (Verschiebungsprinzip: Temperaturverschiebungsfaktor  $a_T [T]$ )



**Bild 3.13** Temperatur- und druckinvariante Viskositätsfunktion

## ■ 4.2 Spannungs-Dehnungs-Verhalten

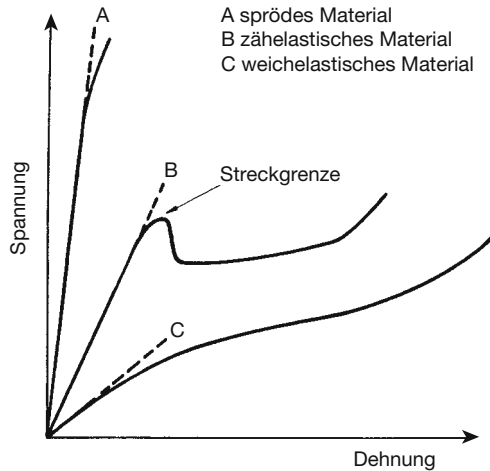
Einflussfaktoren	Bei fast allen Anwendungen von Kunststoffen sind die mechanischen Eigenschaften in irgendeiner Form mitbestimmend. Für die mechanischen Eigenschaften, insbesondere das Spannungs-Dehnungs-Verhalten, spielen neben den von außen auf den Werkstoff einwirkenden Faktoren (wie Temperatur und umgebende Medien) Größe und Zeitdauer der Belastung eine entscheidende Rolle. Dies ist bei den <i>Thermoplasten</i> weit stärker als bei den <i>Duroplasten</i> oder den <i>faserverstärkten Kunststoffen</i> ausgeprägt. Für die Beurteilung des mechanischen Werkstoffverhaltens der Kunststoffe ist daher die übliche Angabe von Festigkeitswerten, wie der <i>Zugfestigkeit</i> , oder von elastischen Kenngrößen, wie dem <i>Elastizitätsmodul</i> , nicht ausreichend. Erst das Spannungs-Dehnungs-Verhalten beschreibt das Verhältnis von innerer Werkstoffanstrengung infolge von äußerlich angreifenden Kräften und den damit erzwungenen Materialdehnungen. Es stellt insofern eine wichtige Information für den Konstrukteur dar.
Beanspruchungsarten	Bezüglich der Beanspruchungsarten unterscheidet man zwischen <i>einachsiger</i> und <i>zweiachsiger Belastung</i> , wobei man prüftechnisch einachsige Belastung vorzieht und nur in besonderen Fällen eine zweidimensionale Belastung aufbringt. Im Wesentlichen werden Probekörper in Biege-, Druck-, Zug-, Scher- und Schubversuchen auf ihr Verhalten unter diesen Belastungsarten untersucht. Diese gängigen Prüfmethoden sind in verschiedenen Normen und Prüfvorschriften beschrieben.
Prüfmethoden	Anhand des Zugversuches lassen sich die Vorgänge im Probekörper beim einachsigen Belastungszustand am einfachsten beschreiben, weshalb im Folgenden vorwiegend auf diese Beanspruchungsart aufgebaut wird. Bei <i>Biege-, Druck- und Scher- bzw. Schubbeanspruchung</i> ist trotz quasi-einachsiger Kraftwirkung mit Überlagerung von Spannungen im Werkstoff insbesondere bei <i>anisotrop</i> aufgebautem Material, wie z. B. geschichteten oder gefüllten Systemen, zu rechnen. Beim Zugversuch werden stabförmige Probekörper mit vorgegebener Geschwindigkeit durch eine äußerlich angreifende Kraft, die parallel zur Stablängsachse wirkt, beaufschlagt, wobei senkrecht zur Belastungsrichtung keine äußeren Kräfte herrschen und demzufolge keine Dehnungsbehinderung eintritt. Während des Belastungsvorgangs werden die Längsverformungen gemessen und als Funktion der Zugkraft aufgezeichnet. Auf diese Weise erhält man eine Kraft-Verformungs-Kurve, die unter Berücksichtigung einflussgebender Prüfparameter rechnerisch oder durch geeignete Messtechnik in einem sogenannten <i>Spannungs-Dehnungs-Diagramm</i> ausgedrückt werden kann.

### 4.2.1 Kurzzeit-Verhalten

Kurzzeitzugversuche	Für die <i>Dimensionierung</i> von Kunststoffherzeugnissen sind, wie bei anderen Werkstoffen auch, Kennwerte aus Kurzzeitversuchen, die unter den oben genannten Belastungsarten ermittelt wurden, grundlegend. In Bild 4.4 werden die Grundformen von Spannungs-Dehnungs-Diagrammen für sprödes, zähelastisches und weichelastisches Material gezeigt. Bei den Kurzzeit-Versuchen wird die <i>Beanspruchungsgeschwindigkeit</i> so gewählt, dass eine zügig wachsende Spannung oder Verformung derart eintritt, dass der charakteristische Werkstoffkennwert, in der Regel <i>zerstö-</i>
---------------------	--



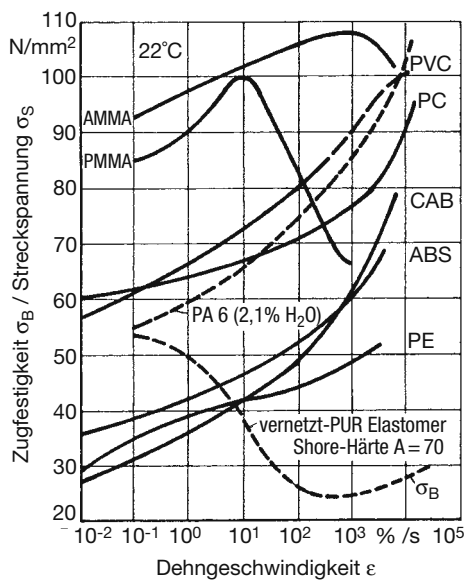
rendes oder *instabiles Probenversagen*, innerhalb von wenigen Minuten eintritt. Die Beanspruchungsgeschwindigkeit kann durch eine konstante Laststeigerung oder durch eine konstante *Verformungsgeschwindigkeit* erzeugt werden, wobei die letztere Variante bei der Prüfung von Kunststoffen üblich ist.



**Bild 4.4**  
Grundformen von Spannungs-Dehnungs-Kurven

Da die Kunststoffe zu den viskoelastischen Werkstoffen zählen, sind ihre mechanischen Eigenschaften von der Dauer und der Geschwindigkeit der Beanspruchung abhängig. Bild 4.5 zeigt den Einfluss, den unterschiedliche Dehngeschwindigkeiten auf die Zugfestigkeit von einigen thermoplastischen Kunststoffen ausüben. Dabei wird deutlich, dass die verschiedenen Kunststoffe bei charakteristischen Dehngeschwindigkeiten eine maximale Festigkeit aufweisen. Diese Dehngeschwindigkeiten liegen zum Teil deutlich über den bei *Kurzzeit-Beanspruchung* gewählten.

viskoelastischer  
Werkstoff



**Bild 4.5**  
Abhängigkeit der Zugfestigkeit bzw. der Streckspannung von der Dehngeschwindigkeit (nach Oberbach)

Angriff *irreversible Veränderungen* der Kunststoffmoleküle bewirken, wie Kettenabbau, Vernetzung, Änderungen in der chemischen Zusammensetzung der Molekülketten, z. B. Oxidation usw.

**Wirkung** Die Wirkungsweise physikalisch aktiver Medien beruht auf einer Aufweitung des Molekülverbandes (äußerlich als Quellung erkennbar). Dadurch wird die Beweglichkeit der Makromoleküle erhöht, Härte und Festigkeit nehmen ab, die elektrischen und andere physikalische Eigenschaften verändern sich. Der Grad der Eigenschaftsänderung hängt mit der *Polarität* von Werkstoff und Medium zusammen („Gleiches löst Gleiches“):

- Nichtpolare Polymere wie PS, PE, PIB quellen oder lösen sich in nichtpolaren *Lösungsmitteln* (z. B. Benzin, Benzol), während sie gegen polare Lösungsmittel (Wasser, Alkohol) beständig sind.
- Polymere, die polare Gruppen enthalten, wie Polyvinylalkohol, Polyamid u. a., sind gegen nichtpolare Substanzen beständig, quellen oder lösen sich dagegen in polaren Stoffen.

**Lagerung** Bei der Ermittlung der Widerstandsfähigkeit gegen Medien werden Probekörper ohne äußere mechanische Belastung in diesen gelagert. Nach steigenden Lagerungszeiten werden bestimmte Eigenschaftsänderungen ermittelt; die Ergebnisse pauschal zusammengefasst in Bewertungsmaßstäben wie z. B. beständig, bedingt beständig und unbeständig (Tabelle 4.1). Diese Klassifizierung gibt natürlich nur einen groben Anhalt über die Verwendbarkeit eines Kunststoffes für einen speziellen Fall. Eine Erprobung unter Praxisbedingungen ist in vielen Fällen unerlässlich.

**Tabelle 4.1** a) Widerstandsfähigkeit einiger Thermoplaste bei Raumtemperatur

	Säuren			Laugen		Kohlenwasserstoffe			Fette, Öle
	schwach	stark	oxydierend	schwach	stark	aliphatisch	chloriert	aromatisch	
Polyethylen hoher Dichte	+	+	-	+	+	+	-	o	+
Polypropylen	+	-	-	+	+	+	-	o	+
PVC-U	+	o	-	+	+	+	-	-	+
PVC-P	+	+	-	+	o	-	-	-	o
Polymethylmethacrylat	+	o	o	+	o	+	-	-	+
Polystyrol	+	o	-	+	+	o	-	-	+
Polytetrafluorethylen	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Polyamid	-	-	-	+	o	+	o	+	+
Polycarbonat	+	+	o	-	-	+	-	-	+

+ = beständig    o = bedingt beständig    - = unbeständig

Tabelle 4.1 b) Widerstandsfähigkeit einiger Duroplaste bei Raumtemperatur

	Säuren			Laugen		Kohlenwasserstoffe			Fette, Öle
	schwach	stark	oxydierend	schwach	stark	aliphatisch	chloriert	aromatisch	
UP-Harze	o	-	-	+	+	+	o	-	+
EP-Harze	+	-	-	+	o	+	o	+	+
vernetzte Polyurethane	o	-	o	+	-	+	o	+	o
elastische Polyurethane	+	-	-	o	o	+	-	-	+
Silikonharze	+	-	-	+	+	o	-	o	+
Harnstoffharz-Pressmasse	o	-	-	+	o	+	+	+	+
Melaminharz-Pressmasse	o	-	-	+	-	+	+	+	+
Phenolharz-Pressmasse	+	-	-	+	-	+	+	+	+

+ = beständig o = bedingt beständig - = unbeständig

## 4.7.2 Spannungsrisssbeständigkeit

Bei Metallen ist die Erscheinung der *Spannungskorrosion* allgemein bekannt. Sie führt bei gleichzeitiger Einwirkung bestimmter Medien und Zugspannungen zur verformungslosen Trennung mit *inter-* oder *transkristallinem* Verlauf. Die Ursachen sind meist elektrochemischer Art.

Metalle

Auch bei Kunststoffen tritt diese Brucherscheinung unter der kombinierten Einwirkung innerer *Orientierungs-* oder *Abkühlspannungen* (herstellbedingt) oder/und äußerer Zugspannungen und bestimmter Flüssigkeiten oder Dämpfe auf. Da es sich hierbei jedoch meist um rein physikalische Prozesse (Benetzung, Diffusion, Quellung) handelt, werden diese Erscheinungen mit *Spannungsrisssbildung* bezeichnet (kein Korrosionsprozess).

Spannungskorrosion

Fast alle Thermoplaste zeigen bei bestimmten Medien Spannungsrisssbildung, wobei folgende Faktoren das Ausmaß noch erhöhen:

Risssbildung

- höhere Zugspannung,
- längere Einwirkdauer,
- höhere Temperatur,
- höhere Kristallinität,
- geringeres Molekulargewicht.

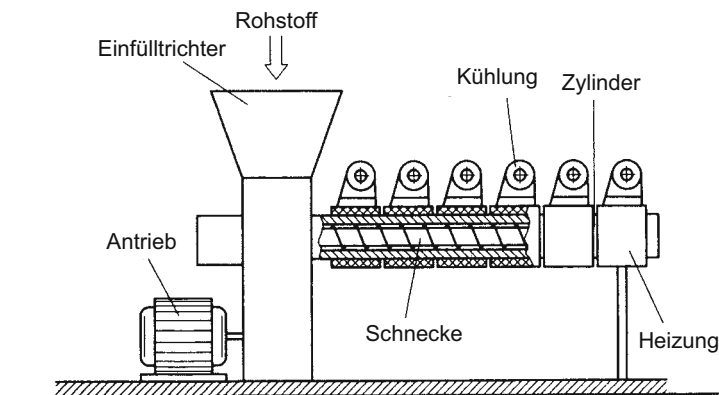
In der Praxis treten Spannungsrisse häufig dann auf, wenn Formteile nachträglich mit ungeeigneten Klebstoffen verbunden oder mit lösungsmittelhaltigen Farben bedruckt werden bzw. im Einsatz mit spannungsrisssauslösenden Medien in Kontakt kommen. Besonders deutlich sind Spannungsrisse bei ungefüllten, glasklaren Kunststoffen wie PS, SAN, PMMA und PC zu erkennen.

Spannungsrisse

### 6.1.1 Der Extruder

Der Extruder ist das Kernstück jeder Extrusionsanlage und hat die Aufgabe, eine homogene Schmelze in ausreichender Menge mit der notwendigen Temperatur und dem notwendigen Druck in das nachfolgende Werkzeug zu fördern. Ein Extruder besteht grundsätzlich aus (Bild 6.2):

- dem Maschinenbett,
- dem Antrieb (Motor, Getriebe, Rückdrucklager),
- der Plastifiziereinheit (Einfülltrichter, Schnecke(n), Zylinder, Heizung, Kühlung) und
- dem Schaltschrank (Steuerung, Regeleinrichtung, Stromversorgung).



**Bild 6.2** Prinzipdarstellung eines Extruders

Je nach Anwendung werden unterschiedliche Extrudertypen eingesetzt. Heute werden überwiegend die folgenden vier Extrudertypen eingesetzt:

- Konventioneller Einschneckenextruder mit *glatter Einzugsbuchse und Dreizonenschnecke*,
- Fördersteifer Einschneckenextruder mit *genuteter Einzugsbuchse und Schnecke mit Misch- und evtl. Scherelementen*,
- *gleichlaufender Doppelschneckenextruder* und
- *gegenlaufender Doppelschneckenextruder*.

Eine Übersicht über die Einteilung der verschiedenen Extrudertypen zeigt Bild 6.3.

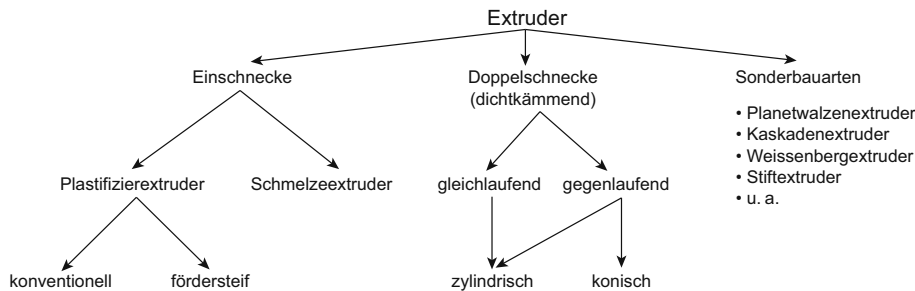


Bild 6.3 Einteilung der Extrudertypen

### 6.1.1.1 Der Einschneckenextruder

Das Prinzip des Einschneckenextruders zeigt Bild 6.4. Im ersten Drittel der Schnecke, der Einzugszone, wird der gewöhnlich granulatformige Rohstoff eingezogen und zur Umwandlungszone bzw. Aufschmelzzone weitergefördert. Dort wird er verdichtet, entlüftet und in den fließfähigen Zustand überführt. Die Austragszone bzw. Meteringzone dient der thermischen und stofflichen Homogenisierung und dem Druckaufbau zur Überwindung des nachfolgenden Formwerkzeugs.

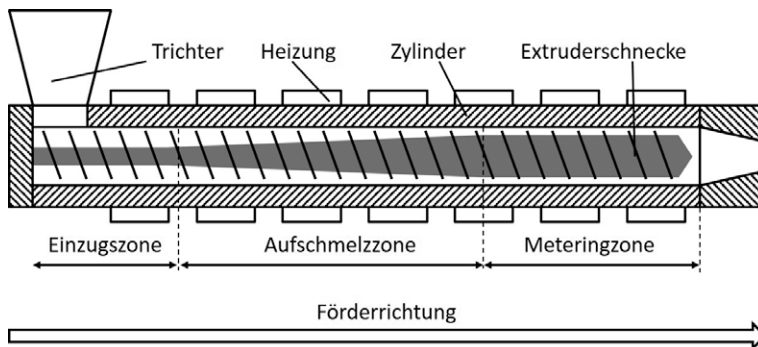


Bild 6.4 Schematische Darstellung des konventionellen Einschneckenextruders

Man unterscheidet grundsätzlich zwischen Schmelze- und Plastifizierextruder. Das Grundkonzept beider Maschinentypen, d.h. Steuerung, Antrieb, Getriebe etc., ist weitgehend identisch. Je nach Art des zu fördernden Materials (Schmelze oder Granulat) ergeben sich für Schmelzeextruder und Plastifizierextruder unterschiedliche, spezifische Schneckengeometrien.

Die an einen Schmelzeextruder gestellten Aufgaben beschränken sich auf die Förderung und die Homogenisierung der Schmelze. Da dieser Extrudertyp nur wenig verbreitet ist, wird auf ihn im Folgenden nicht weiter eingegangen. Alle weiteren Ausführungen beziehen sich auf den Plastifizierextruder.

Die wichtigsten Aufgaben eines Plastifizierextruders sind die Förderung, die Plastifizierung und die thermische und stoffliche Homogenisierung des Materials (siehe Tabelle 6.1). Die Förderung des Materials im Extruder wird durch das Haften der

Schmelzeextruder

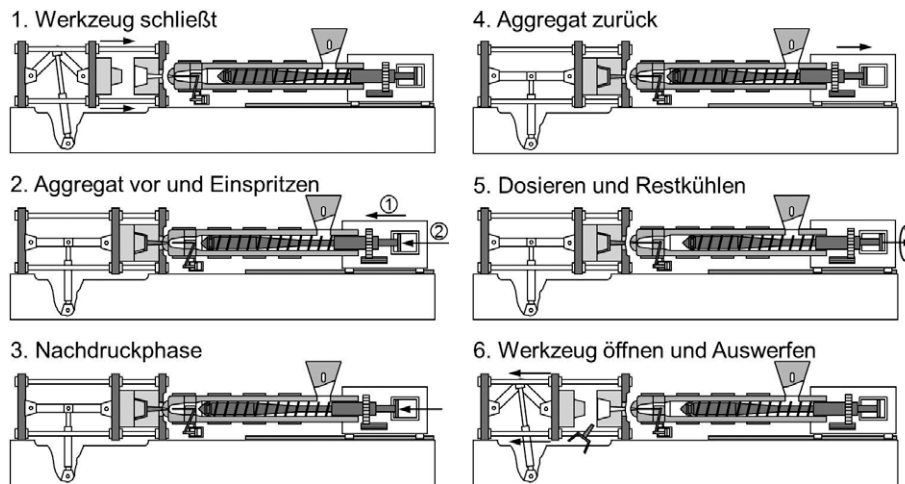
Plastifizierextruder

druckloses Gießen sind nicht mehr möglich, so dass hohe Drücke zur Formgebung erforderlich sind.

### 6.3.1.1 Verfahrensablauf

Für das Spritzgießen ist es notwendig, das vom Rohstoffhersteller meist in Granulat- oder Pulverform (Elastomere üblicherweise in Form von Streifen) angelieferte Material in einen fließfähigen Zustand zu überführen. Dafür wird zunächst das Material durch Rotation der Schnecke aus dem Maschinentrichter eingezogen und durch Dissipation und Wärmeleitung über den temperierten Zylinder plastifiziert (Bild 6.36). Nach Schließen des Werkzeuges (Schritt 1) wird das plastifizierte Material durch axialen Vorschub der Schnecke in das Werkzeug eingespritzt (Schritt 2).

Spritzgießzyklus



**Bild 6.36** Verfahrensablauf beim Spritzgießen

Bei thermoplastischen Materialien wird das Werkzeug gekühlt, so dass die Schmelze mit Eintritt in das Werkzeug abkühlt und mit Unterschreiten der Erstarrungstemperatur (Glasübergangs- bzw. Kristallisationstemperatur) erstarrt. Durch die Abkühlung tritt eine Volumenschwindung ein, die durch eine weitere Schmelzeförderung in der Nachdruckphase (Schritt 3) bestmöglich kompensiert wird. Im Falle vernetzender Materialien (Duroplaste, Elastomere) wird das Werkzeug beheizt und somit der Vernetzungsvorgang initiiert. Nach Abschluss der Nachdruckphase wird das Aggregat zurückgefahren (Schritt 4) und es wird in der Dosierphase (Schritt 5) die Schmelze für den nächsten Zyklus erzeugt. Der letzte Verfahrensschritt umfasst das Öffnen des Werkzeugs und Auswerfen des Formteils (Schritt 6).

Die skizzierten Verfahrensschritte, die sich zeitlich teilweise auch überdecken, sind Bestandteil jedes Spritzgießzyklus. Die Regeleinheit der Spritzgießmaschine übernimmt dabei die Steuerung bzw. Regelung der einzelnen Verfahrensschritte (Bild 6.37).

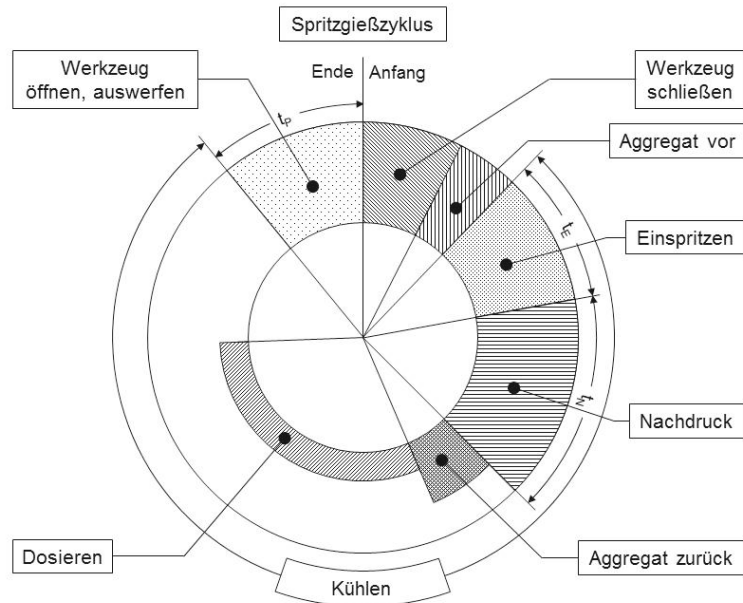


Bild 6.37 Spritzgießzyklus

Ziel bei der wirtschaftlichen Produktion eines Formteils ist es, die für diesen Ablauf benötigte *Zykluszeit* zu reduzieren, um eine hohe Ausstoßleistung zu erreichen. Wie in Bild 6.37 zu sehen, nimmt die Kühlzeit einen erheblichen Teil der Zykluszeit ein und bestimmt daher die Produktivität des Prozesses. Da die Zykluszeit proportional zum Quadrat der Bauteilwanddicke ist ( $t_k \sim s^2$ ), kommt der Bauteilgeometrie eine große Bedeutung zu. Darüber hinaus sind die Temperaturdifferenzen zwischen Formmasse und Werkzeug sowie die thermischen Stoffeigenschaften der Formmasse von Bedeutung.

Zusätzlich zu den oben genannten Verfahrensschritten laufen weitere Funktionen ab, wie die Bewegung des Aggregates oder die Betätigung von Kernzügen und ähnlichen Funktionseinheiten, jedoch ändern diese nichts am grundsätzlichen Verfahrensablauf.

### 6.3.1.2 Maschinenaufbau

Baugruppen Unabhängig vom zu verarbeitenden Material ist eine Spritzgießmaschine aus den folgenden Baugruppen aufgebaut (Bild 6.38): Das *Maschinenbett* nimmt das *Plastifizieraggregat* und die *Schließeinheit* auf. Letztere dient dazu, die Öffnungs- und Schließbewegung des *Werkzeugs* während des Produktionszyklus zu realisieren. Der Ablauf des Spritzgießzyklus wird über eine *Regeleinheit*, welche meist in einem von der Maschine getrennten Schaltschrank untergebracht ist, koordiniert. Nicht zur Maschine gehörig, aber für den Prozess unerlässlich ist das Spritzgießwerkzeug, in dem die geometrische Ausformung stattfindet. Während die Spritzgießmaschine innerhalb bestimmter Schussgewichte und Werkzeugabmessungen uni-

tragsaggregate eingesetzt. Bei der Verwendung von Mehrkomponentensystemen ist für eine homogene Vermischung der Komponenten vor dem Auftragen Sorge zu tragen.

- **Abwarten, bis der Klebstoff verbindungsfähig ist:**

Je nach Art des Klebstoffes müssen gewisse Zeitabstände vor dem Zusammenfügen der Teile eingehalten werden. So ist z. B. bei der Verwendung von Lösemittelklebstoffen dafür zu sorgen, dass die *Ablüftzeit* (Zeit, bis das Lösemittel verdunstet) eingehalten wird. Beim Kleben mit reinen Lösemitteln darf man nur eine begrenzte Zeit (offene Zeit) warten, damit das Lösemittel noch hinreichend wirksam wird.

- **Fügen und Fixieren:**

Es genügt häufig ein Andrücken von Hand oder mit Walzen, bei größeren Teilen werden Pressen eingesetzt. Der Druck soll die Luft zwischen den Klebflächen verdrängen. Bei sogenannten „Sekundenklebern“ wird die maximale Klebfähigkeit durch kurzes Aufbringen eines hohen Druckes erreicht. Physikalisch oder chemisch abbindende Klebstoffe erfordern in der Regel Einrichtungen zum Fixieren der Teile während der Abbindephase. Eine Temperaturerhöhung beschleunigt in der Regel den Abbindevorgang. Der Anpressdruck beeinflusst außerdem die Klebfilmstärke.

- **Aushärten des Klebstoffs**

- **Entfernen der Fixierung:**

Nach Beendigung der Klebung muss vielfach eine weitere Zeit abgewartet werden, bis die Klebverbindung belastet werden darf. Diese Wartezeit kann bis zu einigen Tagen betragen.

Bei richtiger Durchführung ist das Kleben bei Kunststoffen heute als vollwertiges Fügeverfahren anzusehen, mit dem unlösbare Verbindungen mit hohem Kraftschluss hergestellt werden können.

## ■ 7.4 Mechanische Bearbeitung

Die spanende Bearbeitung von Kunststoffteilen ist trotz der moderner Fertigungsverfahren von Kunststoffformteilen, wie z. B. durch Spritzgieß- oder Spritzpressverfahren, oft nicht zu vermeiden. Formteile müssen nachbearbeitet werden (Entgraten), komplizierte Einzelteile z. B. gebohrt, geschliffen oder maßlich angepasst werden und Halbzeuge müssen zugeschnitten und in eine gewünschte Form gebracht werden. Insbesondere bei Einzelanfertigungen, Prototypen und sehr kleinen Serien werden spanende Fertigungsverfahren auch in der Kunststofftechnik oftmals eingesetzt. Weiterhin spielen sie eine zentrale Rolle bei der handwerklichen Anwendung von Kunststoffprodukten, wie z. B. Rohren, Fenstern, Fassadenisolierungen, bei der Reparatur von Kunststoffbauteilen in der Fahrzeugtechnik und Windrädern sowie vielen weiteren Anwendungsfeldern.

spanende Bearbeitung

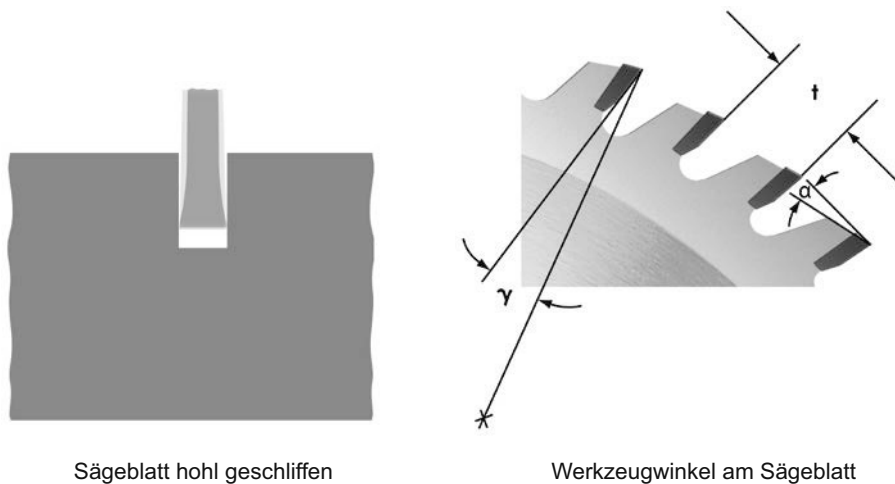
Dabei müssen jedoch die Eigenschaften des Werkstoffes Kunststoff berücksichtigt werden. Da die Wärmeleitfähigkeit der Kunststoffe sehr gering ist, sind *Schnittgeschwindigkeit*, *Vorschub* und *Schneidengeometrie* so zu wählen, dass die entstehende



Wärme weitgehend mit dem Span abgeführt wird. Thermoplaste dürfen sich dabei nicht über 60 °C und Duroplaste nicht über 150 °C erwärmen. Ist eine Kühlung erforderlich, muss darauf geachtet werden, nur solche *Kühlmedien* zu verwenden, die den Werkstoff weder anlösen noch anquellen. Für die Bearbeitung werden Werkzeuge aus Schnellarbeitsstahl (SS-Stahl), Hochleistungsschnellarbeitsstahl (HSS-Stahl), Hartmetall (Sinterlegierung von Metallkarbid), Diamant (Polykristallin-Diamant, PKD; Bordotierter Diamant, BDD) und Korund eingesetzt.

### 7.4.1 Sägen

Kreissägen eignen sich zum Herstellen gerader Schnitte. Als Sägeblätter kommen nur Schnellarbeitsstahl bzw. hartmetallbestückte Sägeblätter in Frage, die ungeschränkt und hohlgeschliffen sein müssen (Bild 7.28). Bei dünnen Tafeln und harten Werkstoffen ist eine kleine *Zahnteilung* erforderlich. Der Antrieb der Kreissägen ist stärker zu dimensionieren als bei der Holzbearbeitung. Richtwerte für das Sägen von Kunststoffen enthält Tabelle 7.4.



**Bild 7.28** Zahngestaltung und Werkzeugwinkel bei Sägeblättern

Der Sägertisch soll beim Sägen, besonders bei spröden Kunststoffen, so eingestellt sein, dass die Zähne nur gering über die Oberfläche der zu sägenden Platte hinausragen. So werden Absplitterungen des Materials beim Durchstoßen des Sägeblattes verhindert, und es wird ein sauberer Schnitt gewährleistet.

Bandsäge:  
Zahnteilungen

Rohre, Blöcke und dickere Tafeln werden mit der Bandsäge zugeschnitten. Auch *Kurvenschnitte* werden mit der Bandsäge vorteilhaft ausgeführt. Bei Bandsägeblättern sind die Zähne im Allgemeinen leicht geschränkt, um das Verschmieren der Zahnluken durch Späne zu vermeiden. Die gegenseitigen Beziehungen zwischen den optimalen Zahnteilungen, den Schnittgeschwindigkeiten und den Materialdicken sind von der Art des Kunststoffes abhängig. Genaue Angaben darüber befinden sich in Tabelle 7.4.

Tabelle 7.4 Richtwerte für das Sägen von Kunststoffen nach VDI-Richtlinie 2003

Kunststoffe	Kurzzeichen	Werkzeug	$\alpha$	$\gamma_K$	$\gamma_B$	$t$	$v_K$	$v_B$
Duroplaste	Organische Füllstoffe Anorganische Füllstoffe	SS	30 bis 40	5 bis 8	5 bis 8	4 bis 8	bis 3000	bis 2000
		HM GFK	10 bis 15	3 bis 6		8 bis 18	bis 5000	
Thermoplaste	PMMA AMMA PS SAN ABS Styrolcopolymer Styrol-Butadien-Copolymer Polyoxymethylen, Polyacetal Polycarbonat Polyfluorethylen Polyvinylidencopolymer Celluloseester Polyolefine Polyamide	HM Diamant	Diamantkorn Z	0 bis (-)4 0 bis 5			1000 bis 2000	300
		SS	30 bis 40 SS 10 bis 15 HM	5 bis 8 SS 0 bis 5 HM	0 bis 8	2 bis 8	Bei spröden Werkstoffen kleine Zahnteilung wählen	bis 3000

 $v$  = Schnittgeschwindigkeit in m/min

Hp = Hartpapier

K = Index für Kreissägen

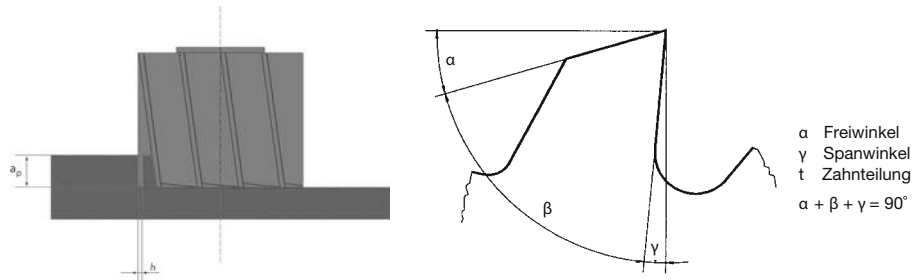
HgW = Hartgewebe

B = Index für Bandsägen

GFK = Glasfaserverstärkte Kunststoffe

## 7.4.2 Fräsen

Werkzeugwinkel Fräser zur Bearbeitung von Kunststoffen haben im Gegensatz zu Fräsern zur Bearbeitung von Metall eine geringere Schneidenzahl, gegenüber Fräsern zur Holzbearbeitung jedoch meist größere Schneidenzahlen, mit Ausnahme der einschneidigen Oberfräser. Die Fräser bestehen aus Schnellarbeitsstahl oder Hartmetall, sie können auch hartmetallbestückt sein. Die Werkzeugwinkel bei Fräsern sind in Bild 7.29 dargestellt. Die Schnittgeschwindigkeit soll möglichst hoch und der Vorschub verhältnismäßig klein gehalten werden, um ein Splintern spröder Werkstoffe zu verhindern. Zur Vermeidung von Materialschädigung ist hier eine intensive Kühlung wichtig. Beim *Umfangs-* und *Formfräsen* von Thermoplasten sollten die Werkzeuge nicht mehr als zwei Schneiden haben, damit die *Spanräume* genügend groß sind und Schwingungen aufgrund der Schneidezahzahl klein bleiben. Die größten Schnittleistungen sind bei hohen Oberflächengüten mit *Einschneidenwerkzeugen* zu erreichen. Für plane Flächen ist das *Stirnfräsen* wirtschaftlicher als das Umfangsfräsen.



$a_p$  = Schnitttiefe  
 $h$  = Spandicke  
 $a_c$  = Fräsbreite  
 $\varphi$  = Winkel Fräsbreite

**Bild 7.29** Werkzeugwinkel bei Fräsen

Spanwinkel Allgemein gilt die Regel: Der Spanwinkel geht umso mehr von positiven Werten gegen Null, je härter der Werkstoff und je dünner das Werkstück ist. Die Schneidenzahl ist umso kleiner, je weicher der Werkstoff ist, dagegen ist der Vorschub größer, um die Wärme mit dem Span abzuführen. Nähere Angaben können der Tabelle 7.5 entnommen werden.

Tabelle 7.5 Richtwerte für das Fräsen von Kunststoffen nach VDI-Richtlinie 2003

Kunststoffe		Kurzzeichen	Werkzeug	$\alpha$	$\gamma$	$v_c$				
Duroplaste	Organische Füllstoffe	Hp Hgw GFK	SS HM	bis 15 bis 10	15 bis 25 5 bis 15	bis 80 bis 1000				
	Schichtpressstoffe und Pressstoffe	Anorganische Füllstoffe	HM Diamant	bis 10	5 bis 15 Diamantkonzentration ca. 50 % Korngröße D 125 bis 250	bis 1000 bis 1500				
Thermoplaste	Polymethylmethacrylat und Copolymere	PMMA AMMA	SS	2 bis 10	1 bis 5	bis 2000				
	Polystyrol und Styrol-Acrylnitril-Copolymere	PS SAN		SS	5 bis 10	bis 10	bis 400			
	Acrylnitril-Butadien Styrolcopolymere	ABS								
	Styrol-Butadien-Copolymere	SB								
	Polyoxymethylen, Polyacetal	POM								
	Polycarbonat	PC								
	Polyfluorethylen	PTFE								
	Polyvinylchlorid hart und VC-Copolymere	PVC CA						5 bis 10 5 bis 25	bis 15	bis 1000
	Celluloseester	CAB								
	Polyolefin	PE, PP						5 bis 15	bis 15	bis 1000
	Polyamid	PA								

$v_c$  = Schnittgeschwindigkeit in m/min

Der Vorschub  $c_f$  kann bis 0,5 mm/U betragen

Hp = Hartpapier

Hgw = Hartgewebe

GFK = Glasfaserverstärkte Kunststoffe

### 7.4.3 Schleifen und Polieren

Das Schleifen wird bei der Kunststoffverarbeitung wenig angewandt. Die Nachbehandlung von Sägeschnitten oder das *Verputzen* von Sägeschnitten kann durch Schleifen sowohl mit handelsüblichen Schleifpapieren (mit groben bis staubfeinen Körnungen) als auch mit Schleifbändern geschehen. Die Schleifgeschwindigkeit bei umlaufenden Schleifbändern soll etwa 10 m/s betragen. Duroplaste können im Allgemeinen gut durch Schleifen bearbeitet werden, während Thermoplaste wegen der hohen Wärmeentwicklung sehr stark zum „Schmieren“ neigen. Durch *Polieren* erhält man seidenmatte bis hochglänzende Oberflächen. Das Polieren kann von Hand oder maschinell mit *Filz-* oder *Schwabbelnscheiben* erfolgen. Die dabei verwendeten Poliermittel haben wesentlichen Einfluss auf die Oberflächengüte.

Voraussetzung für eine gute Politur ist, dass die zu beseitigenden Oberflächenunebenheiten (Kratzer, Riefen) nur gering sind. Beim Polieren von Thermoplasten ist darauf zu achten, dass durch die entstehende Reibungswärme die Oberflächen nicht zu hoch erwärmt werden bzw. schmelzen. Dies lässt sich durch mehrmaliges Unterbrechen des Poliervorganges erreichen.

Schleifgeschwindigkeiten

### 7.4.4 Bohren

Wendelbohrer Bohren kommt in der Werkstatt und in der Fertigung sehr häufig vor. Die fast überall vorhandenen Hand- oder Ständerbohrmaschinen können dafür verwendet werden. Die für die metallischen Werkstoffe bekannten *Wendelbohrer* sind für die Kunststoffe fast immer anwendbar. Von großem Vorteil sind Wendelbohrer mit steilem Drall, da sie eine gute *Spanabfuhr* gewährleisten. Die Spitzenwinkel bei Thermoplasten betragen im Allgemeinen  $60^\circ$  bis  $90^\circ$ . Werkzeugwinkel bei Wendelbohrern sind in Bild 7.30 dargestellt. Genauere Angaben über die Schneidengeometrie sind werkstoffabhängig in Tabelle 7.6 aufgeführt.

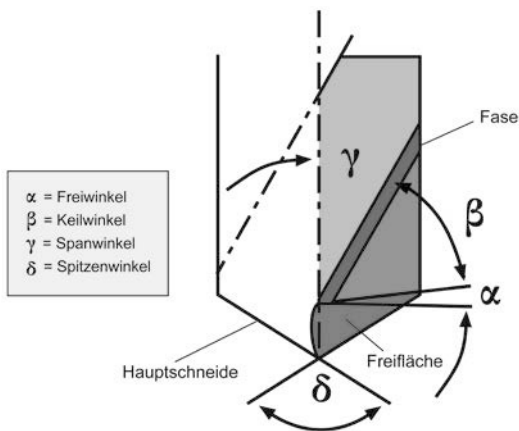
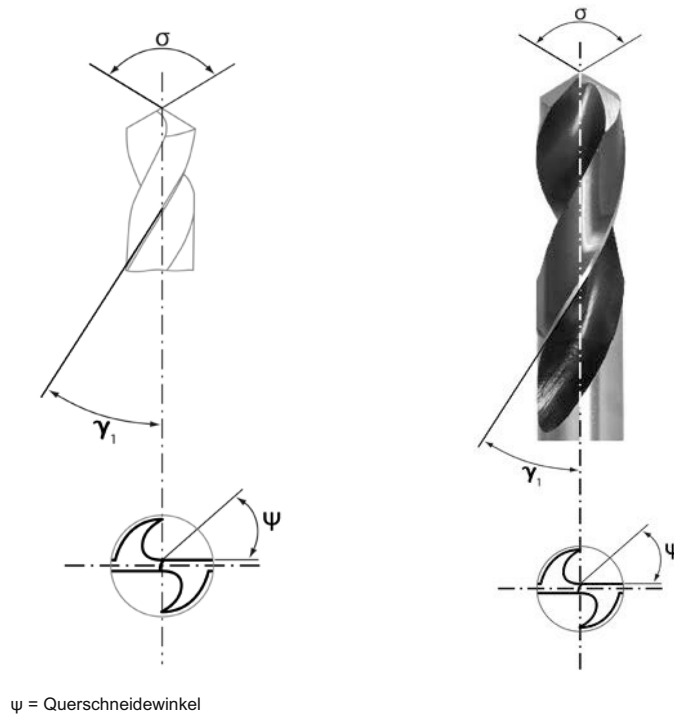


Bild 7.30  
Werkzeugwinkel bei Wendelbohrern

Tabelle 7.6 Richtwerte für das Bohren von Kunststoffen nach VDI-Richtlinie 2003

Kunststoffe	Kurzzeichen	Werkzeug	$\alpha$	$\gamma$	$\varphi$	$\eta$	s	
Duroplaste	Schichtpressstoffe	SS	6 bis 8	6 bis 10	100 bis 120	30 bis 40	0,04 bis 0,6 je nach Bohrer- durchmesser und Füllstoff	
	Organische Füllstoffe	HM	6 bis 8	6 bis 10	100 bis 120	100 bis 120		
	Anorganische Füllstoffe	HM Diamant	6 bis 8	0 bis 6	80 bis 100	20 bis 40		
Thermoplaste	Polymethylmethacrylat und Copolymere	PMMA AMMA	3 bis 8	0 bis 4	60 bis 90	20 bis 60	0,1 bis 0,5	
	Polystyrol und Styrol-Acrylnitril-Copolymere	PS SAN	3 bis 8	3 bis 5	60 bis 90	20 bis 60	0,1 bis 0,5	
	Acrylnitril-Butadien-Styrolcopolymere	ABS	5 bis 8	3 bis 5	60 bis 90	30 bis 80	0,1 bis 0,5	
	Styrol-Butadien-Copolymere	SB	8 bis 10	3 bis 5	60 bis 75	30 bis 80	0,1 bis 0,5	
	Polyoxymethylen, Polyacetal	POM	5 bis 8	3 bis 5	60 bis 90	50 bis 100	0,1 bis 0,5	
	Polycarbonat	PC	5 bis 8	3 bis 5	60 bis 90	50 bis 120	0,2 bis 0,5	
	Polyfluorethylen	PTFE	16	3 bis 5	130	100 bis 300	0,1 bis 0,3	
	Polyvinylchlorid hart und VC-Copolymere	PVC CA	8 bis 10	3 bis 5	80 bis 110	30 bis 80	0,1 bis 0,5	
	Celluloseester	CAB						
	Polyolefin	PE, PP						
	Polyamid	PA		10 bis 12	3 bis 5	60 bis 90	50 bis 100	0,2 bis 0,5

 $v$  = Schnittgeschwindigkeit in m/min $s$  = Vorschub mm/UDer Drallwinkel  $b$  des Bohrers soll ca. 12–16° betragen

Hp = Hartpapier

Hgw = Hartgewebe

GFK = Glasfaserverstärkte Kunststoffe

**Bohrerübermaß** Wegen der starken Ausdehnung der Kunststoffe durch die beim Bohren entstehende Reibungswärme fallen die Bohrungen um 0,05 bis 0,1 mm enger als der Bohrerdurchmesser aus. Man wählt daher in der Praxis ein entsprechendes Bohrerübermaß. Beim Bohren tiefer Löcher lüftet man den Bohrer öfters und kühlt im Allgemeinen mit Druckluft. Bei leicht schmierenden Werkstoffen wie PE und PP ist bei kleinen Schnittgeschwindigkeiten ein sehr großer Vorschub von Vorteil. So kann die Reibungswärme mit dem Span abgeführt werden.

Bei Bohrungen im Bereich von 10 bis 150 mm Durchmesser empfiehlt sich, für dünnwandige duroplastische Werkstücke Hohlbohrer mit Diamantkrone einzusetzen (Bild 7.31), wobei die Schnittflächen nach der spanenden Bearbeitung mit Harz zu versiegeln sind.

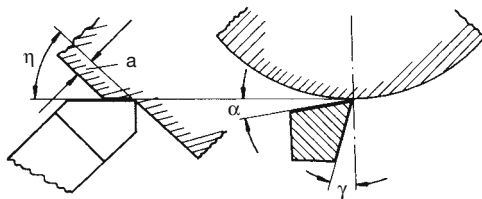


**Bild 7.31**  
Diamanthohlbohrer

### 7.4.5 Drehen

**Drehmaschinen** Die verwendeten Drehmaschinen sollten schnelllaufend, in der Einstellbarkeit der *Spindeldrehzahl* weitgehend variabel und mit einer Luft- und Flüssigkeitskühlung ausgerüstet sein. Die Schnittgeschwindigkeiten betragen je nach Werkstoff bis zu 500 m/min.

**Drehmeißel** Die Drehmeißel können aus Schnellarbeitsstahl sein, wenn geringe Verschleißwirkungen zu erwarten sind. Die Werkzeugwinkel bei Drehstählen sind in Bild 7.32 dargestellt. Bei Duroplasten und vor allem bei Kunststoffen mit Glasfaserfüllungen sollen die Drehmeißel Hartmetallschneiden haben.



**Bild 7.32**  
Werkzeugwinkel bei Drehstählen

Wird das Schneidenprofil leicht abgerundet, entstehen in der Werkstückoberfläche keine scharfkantigen Rillen. Die Oberfläche wird sehr sauber. Genauere Angaben über Richtwerte für die Schneidengeometrie der Werkzeuge zum Längs- und Plan-drehen können der Tabelle 7.7 entnommen werden.

Schneidengeometrie

Tabelle 7.7 Richtwerte für das Drehen von Kunststoffen nach VDI-Richtlinie 2003

Kunststoffe	Kurzzeichen	Werkzeug	$\alpha$	$\gamma$	$\chi$	$v$	$s$	$a$
Duroplaste	Organische Füllstoffe Anorganische Füllstoffe	SS	5 bis 10	15 bis 25 10 bis 15	45 bis 60 45 bis 60	bis 80 bis 400	*	**
		HM	5 bis 11	0 bis 12	45 bis 60	bis 40		
Thermoplaste	Polymethylmethacrylat und Copolymere Polystyrol und Styrol-Acrylnitril-Copolymere Acrylnitril-Butadien-Styrolcopolymere Styrol-Butadien-Copolymere Polyoxymethylen, Polyacetal Polycarbonat Polyfluorethylen Polyvinylchlorid hart und VC-Copolymere Celluloseester Polyolefin Polyamid	PMMA AMMA	5 bis 10	0 bis (-4)	ca. 15	200 bis 300	0,1 bis 0,2	bis 6
		PS SAN						
		ABS	5 bis 10	0 bis 2	ca. 15	50 bis 60	0,1 bis 0,2	bis 2
		SB						
		POM	5 bis 10	0 bis 5	45 bis 60	200 bis 500	0,05 bis 0,25	bis 6
		PC						
		PTFE	5 bis 10	0 bis 5	45 bis 60	200 bis 300	0,05 bis 0,25	bis 6
		PVC CA	10 bis 15	15 bis 20	9 bis 11	100 bis 300	0,05 bis 0,25	bis 6
		CAB	5 bis 10	0 bis 5	45 bis 60	200 bis 500	0,05 bis 0,25	bis 6
		PE, PP	5 bis 15	0 bis 10	45 bis 60	200 bis 500	0,05 bis 0,25	bis 6
		PA						

$v_c$  = Schnittgeschwindigkeit in m/min  
 $c_f$  = Vorschub in mm/U  
 $a_p$  = Spantiefe in mm  
 \* Vorschub  $s = 0,05$  bis  $0,5$  mm/U in Abhängigkeit von Einspannung und Stabilität des Werkstücks sowie der Maschine und der Oberflächengüte  
 \*\* Spantiefe  $a$  bis zu 10 mm in Abhängigkeit von Einspannung und Stabilität des Werkstücks und der Maschine



# 8

## Recycling von Kunststoffen

### ■ 8.1 Einleitung

Das Recycling von Kunststoffen gewinnt seit Jahren immer mehr an Bedeutung und ist heute eine feste Größe in der Kunststofftechnik. Dazu haben vor allem sich ändernde ökonomische, ökologische und gesellschaftliche bzw. gesetzgeberische Zusammenhänge beigetragen. Ein wachsendes Umweltbewusstsein, strengere gesetzliche Auflagen, aber auch steigende Rohstoffkosten sorgen dafür, dass die Wiederverwendung oder Verwertung von Kunststoffen vorangetrieben wird. Es ist absehbar, dass diese Entwicklung auch in Zukunft anhalten wird.

Ein wesentlicher Gesichtspunkt, der für diese Entwicklung mitverantwortlich ist, war zunächst das 1986 in Kraft getretene „Gesetz über die Vermeidung und Entsorgung von Abfällen“. Im Oktober 1996 trat das neue Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz in Kraft, das schließlich im Jahre 2012 durch eine Neufassung ersetzt wurde. Darin werden zwei wesentliche Lösungsansätze für das Problem wachsender Müllberge und schwindender Ressourcen genannt: Oberstes Ziel muss danach zunächst die Vermeidung von Abfällen sein. Die Produktion und der Konsum müssen so gestaltet werden, dass so wenig Abfälle wie möglich entstehen. Sofern Abfälle nicht vermeidbar sind, müssen diese einer Verwertung zugeführt werden, d. h. die Abfälle müssen in den Wirtschaftskreislauf rückgeführt werden. Letztendlich dürfen ausschließlich nicht mehr verwertbare Abfälle umweltverträglich beseitigt werden.

Vermeidung von  
Abfällen

Nach dem Kreislaufwirtschaftsgesetz werden alle Stoffe, die in einem Produktionsprozess anfallen und die nicht das Produkt selbst darstellen, als Abfall definiert. Diese Abfälle werden eingeteilt in „Abfälle zur Verwertung“ und in „Abfälle zur Beseitigung“. Dabei sind Abfälle zur Verwertung Wirtschaftsgüter, die weiter genutzt werden können. Die Nutzung erfolgt entweder stofflich, also durch Rückgewinnung von Rohstoffen aus Abfällen oder energetisch, indem Energie in der Regel durch Verbrennung aus den Abfällen gewonnen wird. Eine Deponierung von unbehandeltem Siedlungsabfall ist in Deutschland seit Mitte 2005 gesetzlich untersagt, dies betrifft auch Kunststoffabfälle, wie z. B. Verpackungen im Hausmüll, Fensterprofile aus Kunststoff im Bauschutt etc.

Abfälle zur Verwertung

Das Kreislaufwirtschaftsgesetz wird in seinem weiten Abfallbegriff konkretisiert durch ein untergesetzliches Regelwerk. Dies sind Verordnungen, die den Vollzug

des Gesetzes erst ermöglichen. So haben die Einführung der Verpackungsverordnung („Grüner Punkt“) im Jahr 1991 und deren Novellierung im Jahr 2003 („Einwegpfand/Dosenpfand“) dazu beigetragen, dass der Verwertung von Kunststoffabfällen ein höherer Stellenwert zukommt. Die Vorgaben zu Recyclingquoten von Kraftfahrzeugen (Altfahrzeug-Verordnung aus dem Jahr 1997; Neufassung 2002) führen dazu, dass auch Kunststoffe in Altfahrzeugen der Verwertung zugeführt werden müssen. Daraus resultiert, dass schon bei der Konstruktion von Kraftfahrzeugen ein Augenmerk auf die spätere Recyclingfähigkeit der Komponenten und Bauteile gelegt werden muss.

Lebenszyklus Die Gewinnung von Sekundärrohstoffen aus Abfällen hat zur Folge, dass die in Bild 8.1 dargestellten Kreisläufe entstehen. Auf dem Weg vom Rohstoff über das Produkt zum Abfall setzen sie an unterschiedlichen Stellen an.

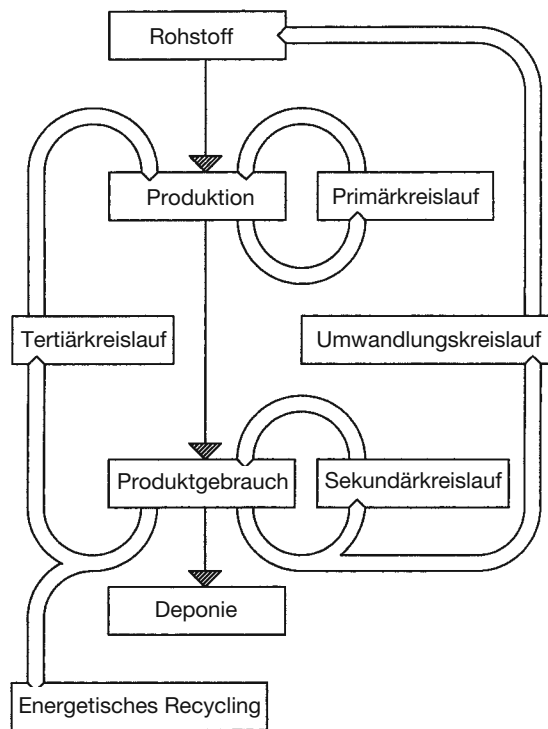


Bild 8.1 Recyclingkreisläufe

Recyclingkreisläufe Grundsätzlich sind vier verschiedene Kreisläufe zu erkennen. Im Primärkreislauf werden Produktionsabfälle wieder in einsetzbare Werkstoffe überführt, was im Allgemeinen als *innerbetriebliches Recycling* bezeichnet wird. Im Sekundärkreislauf wird ein Produkt, das nach seinem Erstgebrauch potenziellen Abfall darstellt, durch *Wiederverwendung* als neues oder anderes Produkt genutzt. Ein Beispiel hierfür sind ausgediente abgefahrene Autoreifen, die als Fender in Häfen eine sinnvolle Weiterverwendung finden. Aber auch die Verwendung von Mehrwegflaschen fällt nach der obigen Definition in den sekundären Recyclingkreislauf. Der Tertiärkreislauf umschließt die Stationen Produktion und Produktgebrauch sowie die anschlie-

# Index

## A

- Abdichten 275
  - Abfall 293
  - Abfallaufbereitung 298
  - Abfallverwertung 296
  - Abkantschweißen 261
  - Abkühlgeschwindigkeit 52
  - Abkühlspannungen 87
  - Abkühlvorgang 250
  - Ablüftzeit 281
  - Abrieb 75
  - Absorption 81
  - Abstechen 290
  - Abzugswalzen 232
  - Additionsverfahren 169
  - Adhäsion
    - mechanische 275
    - spezifische 275
  - Adhäsionskräfte 275
  - Adsorption 88
  - Agenzien 85
  - Akkuköpfe 139
  - akustisches Verhalten 83
  - Alterungsverhalten 65, 275
  - amorph 17
  - Andruckrolle 261
  - Aneinanderspritzgießen 169
  - Angussbuchse 161
  - Angussystem 163
  - Anionen 6
  - anisotrop 66, 200
  - anorganische Füllstoffe 177
  - Anschnitt 163
  - antiadhäsive Beschichtung 251, 259
  - Antiblockmittel 108
  - Antistatika 108
  - Anwärmen 260
  - Apparatebau 264
  - Arbeitsaufnahme 68
  - Arrhenius-Ansatz 65
  - Atombindungen 14
  - Aufheizung 250
  - Aufladungen, elektrostatische 79
  - Aufrauen 280
  - Aufspannplatte
    - düsenseitige 157
    - schließseitige 157
  - Ausdehnung 288
  - Ausformen 230, 233
  - Aushärten 31, 275, 281
  - Auswerfen 181
  - Auswerferbolzen 162
  - Auswerfereinheit 162
  - Auswerferleisten 163
  - Auswerferplatten 162, 163
  - Auswerferringe 163
  - Auswerferstift 162
  - Autoklav 209
- ## B
- Bandsäge 282
  - Barriereeigenschaften 144, 248
  - Baugruppen 149
  - Baustoffklasse 90
  - Bauteilversagen 71
  - Beanspruchungsgeschwindigkeit 66
  - Beflammen 280
  - Behälterbau 264
  - Benetzbarkeit 278
  - Benetzung 87, 275
  - Beschleuniger 204, 277
  - Bewitterung 89
  - bidirektional 203
  - Biegebeanspruchung 66
  - Bindungskräfte, sekundäre 17
  - biologisches Verhalten 90
  - Biostabilisatoren 90
  - Bipolymere 22
  - Blasdorn 133
  - Blasfolienanlagen 131
  - Blaskopf 137
  - Blisterverpacken 250
  - Blockpolymerisation 10
  - Bohren 286
  - Bolzenverschlussdüse 152
  - Brandschutzausrüstung 90
  - Brandverhalten 90
  - Brechung 80
  - Brechungsindex 80
  - Breitschlitzverteiler 126
  - Brenner 192
  - Buss-Ko-Knetter 104
  - Butzen 133

- C**
- Carreau-Ansatz 39
  - Chemikalienbeständigkeit 85
  - chemische Reaktion 277
  - CIE-Farbtafel 82
  - Coextrusion 131
  - Compatibilizer 300
  - Copolymere 22
  - Corona-Behandlung 280
- D**
- Dämpfung 83
    - mechanische 63
  - Dämpfungseigenschaften
    - elektrische 267
    - mechanische 267
  - dauerbeheiztes Element 263
  - Dauerschwingversuche 71
  - Deformation 50, 63
  - deformationsmechanisches Verhalten 278
  - Deformationsmodell 65
  - Dehnung 202
  - Dekompressionshub 150
  - dekorierte Formteile 175
  - Desorption 88
  - Diamant 282
  - Dichte 27, 55
  - Dickenverteilung 253
  - Dielektrikum 76
  - dielektrischer Verlustfaktor 269
  - Dielektrizitätskonstante 76
  - Differentialkalorimetrie 32
  - Diffusion 78, 87f.
  - Diffusionssperre 209
  - Dimensionierung 66
  - Dipol 15
  - Dipolkräfte 15
  - Dipolpolarisation 76
  - Dispersion 80
  - Dispersionsfrequenz 77
  - Dispersionsgebiet 77
  - Dispersionsklebstoffe 277
  - Dispersionskräfte 15
  - Doppelbindung 14
  - Doppelschneckenextruder
    - gegenlaufender 112, 125
    - gleichlaufender 112, 124
  - Dornhalter 127
  - Dosierphase 150
  - Dosierung, gravimetrische 101
  - Dosiervolumen 150
  - Dosierweg 150
  - Drehbankprinzip 209
  - Drehmaschinen 288
  - Drehmeißel 288
  - Dreifachbindung 14
  - Druckaufnehmer 164
  - Druckbeanspruchung 66
  - Druckluft 253
  - DSC 32
  - DSC-Analyse 52
  - Durchfluss-Dichtemessgerät 28
  - Durchgangswiderstand 78f.
  - Durchschlagfestigkeit, elektrische 78
  - Durchsichtigkeit 80
  - Durchstoßversuche 68
  - Duroplaste 20, 66, 176, 274, 285
  - duroplastischer Kunststoff 203
  - Düsenanpresskraft 155
  - Düsen, offene 151
- E**
- Eigenschaftsprofil 63
  - einachsige Belastung 66
  - Eindiffundieren 85
  - Einfachbindung 14
  - Einlaufdruckverlust 45
  - Einlaufeffekte, elastische 45
  - Einschneckenextruder 113
    - fördersteife 120
    - konventionelle 118
  - Einschneidenwerkzeuge 284
  - Einspritzdruck 148, 153
  - Einspritzphase 153
  - Einspritzvolumenstrom 153
  - Einstationenmaschine 248
  - Einstellbarkeit 288
  - Einzugszone 117
  - Elastizitätsmodul 66, 83
  - Elastomere 20, 274
  - Elastomerverarbeitung 191
  - Elektrisch leitfähige Füllstoffe 109
  - Elektromuffenschweißen 262
  - Elektronegativität 15
  - Elektronenleitung 78
  - Elektronenpolarisation 76
  - E-Modul 202
  - Emulsionspolymerisation 11
  - Energie 255
  - Energieabsorption 68
  - Entdröhnungsmassen 85
  - Entflammbarkeit 91
  - Entformungstemperatur 143
  - Entgasungsextruder 118
  - Entgraten 181
  - Erholen 63
  - Erwärmungsphase 259
  - Erwärmungszeit 256
  - Extrapolationsmethoden 64
  - Extruder 112
  - Extrusion 111
  - Extrusionsschweißen 266
  - Extrusionswerkzeuge 126
- F**
- Fächelschweißen 265
  - Fadenspannung 210
  - Fällungspolymerisation 11
  - Farbe 81
  - Farbstoffe 204
  - Faserlänge 206
  - Faserspritzen 208
  - Faservolumengehalt 206
  - Faserwickeln 209
  - Fernfeldschweißen 268
  - Festigkeit 202
  - Feuchtigkeit 89
  - Filzscheiben 285
  - Fixieren 281
  - Flächenpressung 75
  - Flammschutzmittel 109

Fließbewegung 256  
 Fließkurve 36  
 – scheinbare 43  
 Fließmarkierungen 128  
 Fließtemperatur 18  
 Fluidinjektionstechnik 169  
 Flüssigkeitsheizung 156  
 Flüssigkeitskühlung 288  
 Foliengießen 237  
 Formdrehen  
 – radiales 290  
 – tangenciales 290  
 Formfräsen 284  
 Formplatte 161  
 Formstation 249  
 Formteilprüfungen 91  
 Formteilschweißen 259  
 Formverfahren 252  
 Formvorgang 251  
 Fräser 284  
 freies Volumen 78  
 Friktion 178  
 Friktionswärme 149  
 Fügen 281  
 Führungsbolzen 161  
 Füllstoffe 28  
 – leitfähige 78  
 Füllstoffgehalt 33  
 funktionelle Gruppen 12  
 Funktionstauglichkeit 91

## G

Gasinjektionstechnik 170  
 Gebrauchstauglichkeit 91  
 Gelege 203  
 genutete Einzugsbuchse 112  
 Gewebe 203  
 Gießen 233  
 Gießharze 233  
 Glanz 81  
 glasartige Brüche 68  
 glasmattenverstärkte Thermo-  
 plaste 222  
 Glasübergangsbereich 51  
 Glasübergangstemperatur 18, 21

glatte Einzugsbuchse 112  
 Gleitmittel 107  
 Gleitreibungskoeffizient 75  
 Globalstrahlung 89  
 GMT 222  
 Graten 192  
 Grenzflächen 78  
 Grundplatte 161f.

## H

Haftfestigkeit 275  
 Haft-Gleit-Effekt 75  
 Haftklebstoffe 277  
 Haftreibungskoeffizient 75  
 Hagen-Poiseuillesches Gesetz  
 42  
 Halbzeuge 250, 259  
 Handbohrmaschinen 286  
 Handlaminierverfahren 207  
 Härten 180  
 Härter 277  
 Hartmetall 282  
 Hart-PVC 228  
 Hart-Weich-Kombinationen 171  
 Haupt- und Nebervalenzkräfte  
 14  
 Hautschicht 169  
 Heißabschlag 107  
 Heißkanal-System 163  
 Heizelement-Muffenschweißen  
 262  
 Heizelementschweißen 259  
 Heizelement-Strahlungsschweißen 259  
 Heizelementstumpfschweißen  
 259  
 Heizkeilschweißen 261  
 Heizplatten 165  
 Herzkurven 137  
 HE-Schweißen 259  
 heterogene Gemische 23  
 HF-Schweißen 269  
 Hinterschneidungen 255  
 Hinterspritztechnik 175  
 Hochfrequenz 178

Hochfrequenzschweißen 269  
 hochintegrierte Formteile 165  
 Hochleistungsschnellarbeitsstahl  
 282  
 Hochtemperatur-Heizelement-  
 schweißen 259  
 Hochtemperatur-Verfahren 228  
 Hohlbohrer mit Diamantkrone  
 288  
 Hohlkörper 170, 268  
 homogene Gemische 23  
 Homogenisierung  
 – mechanische 191  
 – thermische 191  
 HS-Schweißen 259  
 HT-Verfahren 228  
 Hydrierung 303  
 hydrophil 78  
 hydrophob 78  
 Hysterese 274

## I

Impedanz 84  
 Induktionsschweißen 274  
 Ineinanderspritzgießen 169  
 Infrarot-Strahlungserwärmung  
 251  
 Innenausdrehstähle 290  
 innerbetriebliches Recycling  
 297  
 instabiles Probenversagen 67  
 interkristalliner Verlauf 87  
 Ionenpolarisation 76  
 irreversible Veränderungen 86  
 isochrone Spannungs-  
 Dehnungs-Diagramme 70  
 Isolation 275  
 Isolatoren 30, 77

## K

Kalander 228  
 Kalandrieren 228  
 Kaltabschlag 107  
 Kaltkanal 163

Kapillarrheometer 42  
 Kaskadenspritzgießen 172  
 Katalysatoren 7, 9  
 Kationen 6  
 Kavität 160  
 Keimbildung 52  
 Kerbschlagversuche 68  
 Kernschicht 169  
 Kettenreaktion 4  
 Klebstoffe 277  
 – chemisch abbindende 276  
 – physikalisch abbindende 276  
 Knetter 103  
 Kniehebelschließbarkeit 157  
 Kohäsion 275  
 Kohäsionskräfte 275  
 Kompressionsphase 154  
 Kompressionszone 117  
 Kondensationsharze 176  
 konkaver Formhohlraum 253  
 Kontakterwärmung 251  
 Kontaktklebstoffe 277  
 Konvektionserwärmung 250  
 Konzept der repräsentativen  
   Viskosität 43  
 Korrekturverfahren 43  
 Korund 282  
 Kraft-Verformungs-Kurve 66  
 Kreislaufwirtschafts- und Abfall-  
   gesetz 293  
 Kreissägen 282  
 Kriechen 63  
 Kriechmodullinien 70  
 Kristallisation 52  
 Kristallisationsgrade 51  
 Kristallisationstemperatur 52  
 Kristallwachstum 52  
 Kugeldruck-Härte 72  
 Kühlmedien 282  
 Kühlung 284  
 Kühlwalzen 232  
 Kurvenschnitte 282  
 Kurzzeit-Beanspruchung 67

**L**

Laserdurchstrahlschweißen 271  
 Leitfähigkeit 78  
 Lichtdispersion 80  
 Lichtdurchlässigkeit 80  
 Lichtschutzmittel 89  
 Lichtstrahlen 80  
 Lichtstrahlschweißen  
 – direkt 271  
 – indirekt 271  
 Lichtstreuung 80  
 Liner 209  
 Longitudinalschwingungen 268  
 Longitudinalwellenmodul 83  
 Lösemittel 277  
 Lösemittelklebstoffe 277  
 Löslichkeit 278  
 Lösungspolymerisation 10  
 Luftfeuchtigkeit 277  
 Luftkühlung 288  
 Luvitherm-Prozess 228

**M**

Makromoleküle 3  
 – vernetzte 277  
 Maschinenbett 146, 165  
 Masterkurve 40  
 Materialdicken 282  
 Matrix 202  
 mechanisches Dämpfungs-  
   vermögen 268  
 Medieneinfluss 275  
 Medienleitungen 171  
 Mehrfachköpfe 140  
 Mehrfachwerkzeuge 140  
 Mehrfarben-Spritzgießen 171  
 Mehrkomponenten-Spritzgießen  
   165  
 Mehrkomponentensysteme 277  
 Mehrrohstoff-Spritzgießen 171  
 Mehrstationenmaschine 248  
 Melt flow rate (MFR) 47  
 Melt volume index (MVI) 47  
 Melt volume rate (MVR) 47

metallischer Kern 176  
 Metallkomplexverbindungen 9  
 Meteringzone 117  
 Mikrohärtigkeit 73  
 Mikroorganismen 90  
 Modifikation 63  
 Molekülkette  
 – lineare 17  
 – verzweigte 17  
 Monomere 4  
 Montage-Spritzgießen 172

**N**

Nachbehandlung 285  
 Nachdruckphase 154  
 Nachdruckzeit 155  
 Nachkristallisation 52  
 Nadelverschlussdüse 151  
 Nahtebene 256  
 Nahtqualität 255  
 Nebenprodukte 11  
 Nebenvalenzkräfte 275  
 Negativformverfahren 252  
 newtonsche Fluide 35  
 nichtlineare Maxwell-Elemente  
   65  
 nicht-linear viskoelastische  
   Werkstoffe 63  
 nicht-newtonsche Fluide 35  
 Niederdruckverfahren 172  
 niedrigschmelzende Legierung  
   176  
 Normalspannungseffekt 50  
 Normfarbwerte 82  
 Normspektralwertkurven 82  
 Nukleierung 54  
 Nullviskosität 36  
 Nutbuchsenextruder 119

**O**

Oberfläche  
 – geometrische 275  
 – wahre 275  
 – wirksame 275

- Oberflächenbeschaffenheit 75  
 Oberflächengestalt 275  
 Oberflächenglanz 144  
 Oberflächengüte 285  
 Oberflächenspannung 278  
 Oberflächenstruktur 81  
 Oberflächenunebenheiten 285  
 Oberflächenwiderstand 78f.  
 Oberstempel 253  
 offene Zeit 277  
 Orientierung 76, 142, 202  
 Orientierungsspannungen 87  
 Overmoulding 171  
 oxidative Prozesse 89
- P**
- Partikelrecycling 297  
 Permeation 88  
 Permeationsrate 88  
 Peroxide 5  
 Pfropfpolymer 22  
 physikalisch abbindende  
   Klebstoffe 277  
 Pinole 128, 137  
 plane Flächen 284  
 Planetwalzenextruder 105  
 Plasmabeschichten 88  
 Plastifikator 105  
 Plastifizieraggregat 146  
 Plastifiziereinheit 149  
 Plattenmaschine 248  
 polare Gruppen 269  
 Polarität 86  
 Polieren 285  
 Polyaddition 277  
 Polyaddukte 12  
 Polykondensation 11, 277  
 Polymerblend 23  
 Polymerisation 277  
   – anionische 8  
   – ionische 6  
   – kationische 7  
   – radikalische 6  
 Positivformverfahren 252  
 Positivkern 254
- Potenzialschwellen 78  
 Praxisverhalten 91  
 Prepreg 204  
 Prepregverarbeitung 209  
 Pressen 220, 225  
 Pressmassen 220, 222  
 Produzentenhaftung 91  
 PVC-Weich-Kalender 228  
*p-v-T*-Diagramm 28  
 Pyrolyse 303
- Q**
- Qualitätskriterien 91  
 Qualitätssicherung 91  
 Quellung 86f.  
 Querkontraktionszahl 83
- R**
- Radikal 6  
 Raumnetzmoleküle 21  
 Reaktionsgeschwindigkeit 89  
 Reaktionsklebstoffe 276f.  
 Recycling  
   – stoffliches 302  
   – werkstoffliches 299  
 Recyclingkreislauf 294  
 Recyclingmaterial 170  
 Reduzierung der Zykluszeit 171  
 Reflektormeterwert 81  
 Reflexionseigenschaften 81  
 Regeleinheit 146, 165  
 Regenerat 134  
 Reibung 75  
   – äußere 267  
   – innere 267  
 Reibungsbewegung  
   – linear 267  
   – winkeloszillierend 267  
 Reibungsverluste 85  
 Reibungswärme 267, 285, 288  
 Reibverhalten 72  
 Reinigen 280  
 Relativbewegung 267  
 Relaxation 50
- Relaxationsversuche 70  
 Relaxieren 63  
 Remissionswert 82  
 Resonanz 268  
 Restkühlzeit 155  
 Retardation 50, 63, 69  
 Rheologie 34  
 Ringfadenaugie 211  
 Ringkanäle 137  
 Ritzhärte 75  
 Rockwell-Härte 73  
 Rollenautomaten 249  
 Rotationsformen 236  
 Rotationsreibschweißen 267  
 Rotationsrheometer 46  
 rotationssymmetrische  
   Fügenähte 267  
 Rovings 203  
 Rückdrückstifte 162  
 Rückprallhärte 73  
 Rückstromsperre 153  
 Rutschgleiten 75
- S**
- Sägen 282  
 Sandstrahlen 280  
 Sandwich-Spritzgießen 169  
 Sandwichstruktur 169  
 Schallausbreitung 85  
 Schalldämmung 85  
 Schallgeschwindigkeiten 83  
 Schallreflexion 85  
 Schallschluckstoffe 85  
 Schallwellen 83  
 Scherbeanspruchung 66  
 Schergeschwindigkeit 34f.  
 Scherströmung 34  
 Scherviskosität 35  
 Schlagbiegeversuche 68  
 Schlagzähigkeit 68  
 Schlagzugversuche 68  
 Schleifbänder 285  
 Schleifen 280, 285  
 Schleifgeschwindigkeit 285  
 Schleifpapiere 285

- Schleudergießen 236  
 Schleuderguss 233  
 Schlichte 203  
 Schließeinheit 146  
 – vollhydraulische 159  
 Schließkraft 148, 157  
 Schmelze-Massefließrate 47  
 Schmelze-Volumenfließrate 47  
 Schmelzindexmessung 48  
 Schmelzkerntechnik 176  
 Schmelzklebstoffe 277  
 Schnecke 116  
 Schneckenvorlauf-  
   geschwindigkeit 152  
 Schneckenvorplastifizierung mit  
   Kolbeneinspritzung 191  
 Schneckenorraum 224  
 Schneidengeometrie 281, 289  
 Schneidenprofil 289  
 Schneidenzahl 284  
 Schnellarbeitsstahl 282  
 Schnellschweißen 265  
 Schnitte, gerade 282  
 Schnittgeschwindigkeit 281,  
   284  
 Schnittleistungen 284  
 Schrumpf 263  
 Schubbeanspruchung 66  
 Schubmodul 63, 83  
 Schubmodulkurve 21  
 Schüttsintern 233  
 Schwabbeln 285  
 Schweißbarkeit 257  
 Schweißstabhaltung 265  
 Schweißzeit 256  
 Schweißzusatz 264  
 Schwellbeanspruchungen 71  
 Schwenkbiegeschweißen 261  
 Schwimmhäute 192  
 Schwindungsunterschiede 171  
 Schwingungen 284  
 Schwingungsdämpfung 275  
 Sequenzverfahren 169  
 Sheet Moulding Compound 220  
 Shore-Härte 72  
 Skinverpackung 249  
 SMC 220  
 Snelliussches Brechungsgesetz  
   80  
 Sonderverfahren 165  
 Spanabfuhr 286, 290  
 Spannungs-Dehnungs-  
   Diagramme 66  
 – isochrone 69  
 Spannungsinhomogenitäten  
   278  
 Spannungskorrosion 87  
 Spannungsrissbildung 87  
 Spanräume 284  
 Spanwinkel 284  
 Speicherköpfe 139  
 Spindeldrehzahl 288  
 Spritzgießen 144, 182  
 Spritzprägen 173  
 Spritzprägeverfahren 173  
 Spritzpressen 178, 181  
 Spülluftverfahren 136  
 Stabilisatoren 89, 108, 204  
 Ständerbohrmaschinen 286  
 Stangenanguss 160  
 Stanzstation 249  
 Stanzversatz 249  
 Startreaktion 7  
 Staudinger 3  
 Staudruck 150  
 stehende Welle 268  
 steiler Drall 286  
 Stempelknetter 229  
 Steuereinheit 165  
 stick-slip 75  
 Stiftextruder 104  
 Stirnfräsen 284  
 stoffschlüssige Verbindung 171,  
   256  
 Stoßelastizität 73  
 Strahlung 89  
 Streckblasen 142  
 Stromimpuls 263  
 Strömung  
 – isotherm 42  
 – laminar 42  
 – stationär 42  
 Strukturschaum 166  
 Stufenreaktion 11  
 Stützleisten 162  
 Super Critical Fluid 168  
 Suspensionspolymerisation 11
- ## T
- Tafel-Extrusionsanlage 130  
 Tandemaschinen 140  
 Tapelegen 209  
 Temperatur 89  
 Temperaturfühler 164  
 Temperieraggregat 147, 164  
 Ter- oder Quarterpolymere 22  
 Thermoformen 251  
 thermomechanische Analyse  
   29  
 Thermoplaste 66, 274, 285  
 – teilkristalline 17, 51  
 Thermoplast-Schaumspritz-  
   gießen (TSG) 166  
 TMA 29  
 Tränkbad 210  
 Transfer Moulding 181  
 transkristalliner Verlauf 87  
 Transmissionswert 82  
 Transparenz 80, 144  
 Treibmittel 109, 167  
 Trennebene 160  
 Trockengleitung 75  
 Trübung 80
- ## U
- Ultraschallschweißen 85, 268  
 Umfangsfräsen 284  
 Umlenkkopf 137  
 Umschaltung 154  
 Umstellphase 259  
 Umstellvorgang 251  
 unidirektional 203  
 Universalschnecken 149



**V**

Vakuum 247  
 Van der Waalssche Kräfte 14  
 Verarbeitbarkeit 63  
 Verbund-Spritzgießen 171  
 Verdickungsmittel 204  
 Verformungsgeschwindigkeit 67  
 Verformungsverhalten 63  
 Vergasung 303  
 Verlustfaktor 77, 83  
 Verpackungsartikel 132  
 Verputzen 285  
 verschärfte Prüfungen 65  
 Verschleiß 75  
 Verschleißverhalten 72  
 Verschleißwirkungen 288  
 Verschlussdüsen 151f.  
 Verschmieren 282  
 Verstärkungsfaser 202  
 Verstreckkräfte 142  
 Verstrecktemperatur 142  
 Verträglichkeit 301  
 Verträglichkeitsverbesserer 300  
 Verwertung  
 – energetische 304  
 Vibrationsschweißen 267  
 Vickers-Härte 73  
 Viskoelastizität 49  
 Viskosität 34f., 204  
 Viskositätskurve 36  
 – wahre 43  
 volumetrische Dosiersysteme 100  
 Vorbehandlung 275  
 Vorformlingsextrusion 133, 138  
 Vorformlingsherstellung 143

**W**

Wachstumsreaktion 7  
 Walkstrecke 210

Walzwerke 102  
 Wanddicken 171  
 Wanddickenprogrammierung 138  
 Wandhaftende Schmelze 122  
 Wärmeausdehnung 29  
 Wärmeausdehnungskoeffizient 29  
 Wärmedämmmaterial 30  
 Wärmeimpulsschweißen 263  
 – beidseitiges 263  
 – einseitiges 263  
 Wärmekapazität, spezifische 31  
 Wärmekontaktschweißen 263  
 Wärmeleitfähigkeit 30, 281  
 Wärmeleitung  
 – direkte 259  
 – indirekte 259  
 Wärmestrahlung 270  
 Warmgasschweißen 264  
 Warmgastemperatur 264  
 warmhärtende Harze 204  
 Wasserinjektionstechnik 170  
 Wasserstoffbrücken 15  
 Wechselbeanspruchungen 71  
 Wechselwirkungen, elektromagnetische 278  
 Weichmacher 90  
 Weißenberg-Rabinowitsch-Korrektur 43  
 Wellenwiderstand 84  
 Wendelverteiler 128, 137  
 Werkstoffeigenschaften  
 – rheologische 27  
 – thermodynamische 27  
 Werkstückoberfläche 289  
 Werkzeug 146  
 Werkzeugauftriebskraft 157  
 Werkzeug mit Tauchkanten 173  
 Werkzeugtemperiervorrichtungen 147

Werkzeugwinkel 284, 288  
 Wickelvorrichtung 228  
 Widerstandsfähigkeit, chemische 85  
 Widerstandsheizbänder 156  
 Widerstandswendeln 262  
 Wirbelmischer 229  
 Wirbelstromverluste 274  
 WLF-Ansatz 41  
 Wöhlerkurven 72

**Z**

Zähigkeitsverhalten 68  
 Zahnteilungen 282  
 Zeitbruchlinien 70  
 Zeitdehnlängen 69  
 zeitraffende Prüfmethode 64  
 Zeitspannungslinien 70  
 Zeitstandfestigkeit 70  
 Zeitstandschaubild 70  
 Zeitstandsversuche 69  
 Zeit-Temperatur-Verschiebungsregeln 64  
 Zeitverformungslinien 69  
 Zentrierflansch 161  
 Zersetzungstemperatur 21  
 zerstörendes Probenversagen 66  
 Zieherschweißen 265  
 Zugfestigkeit 66  
 Zusatzmaterial 265  
 Zusatzstoffe 63  
 Zuschlagstoffe 23, 107  
 Zwangsförderung 125  
 zweiachsige Belastung 66  
 Zweikomponentensysteme 277  
 Zwischenplatte mit Kühlbohrungen 162  
 Zykluszeit 146  
 Zylinderheizung 156