

Einführung in die Kunststoffverarbeitung

Bearbeitet von
Christian Hopmann, Walter Michaeli

8., überarbeitete und erweiterte Auflage. 2017. Buch. XXII, 315 S. Hardcover

ISBN 978 3 446 45355 5

Format (B x L): 19,5 x 24,4 cm

Gewicht: 824 g

schnell und portofrei erhältlich bei


DIE FACHBUCHHANDLUNG

Die Online-Fachbuchhandlung beck-shop.de ist spezialisiert auf Fachbücher, insbesondere Recht, Steuern und Wirtschaft. Im Sortiment finden Sie alle Medien (Bücher, Zeitschriften, CDs, eBooks, etc.) aller Verlage. Ergänzt wird das Programm durch Services wie Neuerscheinungsdienst oder Zusammenstellungen von Büchern zu Sonderpreisen. Der Shop führt mehr als 8 Millionen Produkte.



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

Vorwort zur achten Auflage	V
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
 Die Autoren	 XI
 Kurzzeichen für Polymere	 XIII
 1 Einleitung	 1
Literatur	2
 2 Aufbau und Einteilung der Kunststoffe	 3
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

3	Physikalische Eigenschaften der Kunststoffe	27
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
4	Werkstoffkunde der Kunststoffe	63
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	Spannungsrisssbeständigkeit	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
5	Aufbereitung von Kunststoffen	99
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
6	Verarbeitungsverfahren für Kunststoffe	111
6.1	Extrusion	111
6.1.1	Der Extruder	112
6.1.1.1	Der Einschnckenextruder	113
6.1.1.2	Die Schnecke	116
6.1.1.3	Konventionelle Einschnckenplastifizierextruder	118

6.1.1.4	Der fördersteife Einschneckenextruder	120
6.1.1.5	Der Plastifiziertvorgang 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	Schüttintern	235
6.9.3	Schleudergießen (Rotationsformen)	236
6.9.4	Foliengießen	237
6.9.5	Umgießen	237
6.9.6	Imprägnieren	237
	Literatur	238
7	Weiterverarbeitungstechniken für Kunststoffe	247
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	Wärmgasschweißen	264
7.2.2.1	Fächelschweißen (Runddüse)	265
7.2.2.2	Ziehschweißen (Schnellschweißen)	265
7.2.2.3	Warmgas-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
8	Recycling von Kunststoffen	293
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
Index		309

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 Flammenschutzmittel 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.

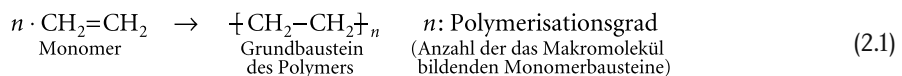
Die niedermolekularen Ausgangsmoleküle bezeichnet man bei allen Reaktionsvorgängen als *Monomere*.

2.1.1.1 Polymerisation

Monomere als
Grundbausteine

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

Im Fall der Polymerisation besitzen die Monomere aufspaltbare Doppel- bzw. Dreifachbindungen. Nach erfolgter Reaktion stellen sie die Basis für die sich wiederholende Einheit dar und bilden somit den Grundbaustein eines Polymers. Als einfaches 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).

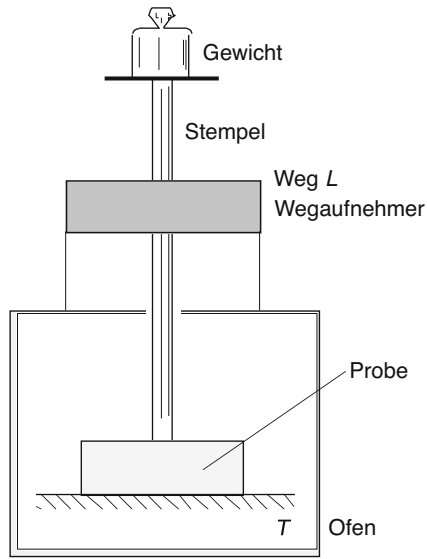


Bild 3.2
Prinzip der TMA (Thermomechanische Analyse)

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* λ 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 $0,15 \text{ W/(mK)} \leq \lambda \leq 0,5 \text{ W/(mK)}$ (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.

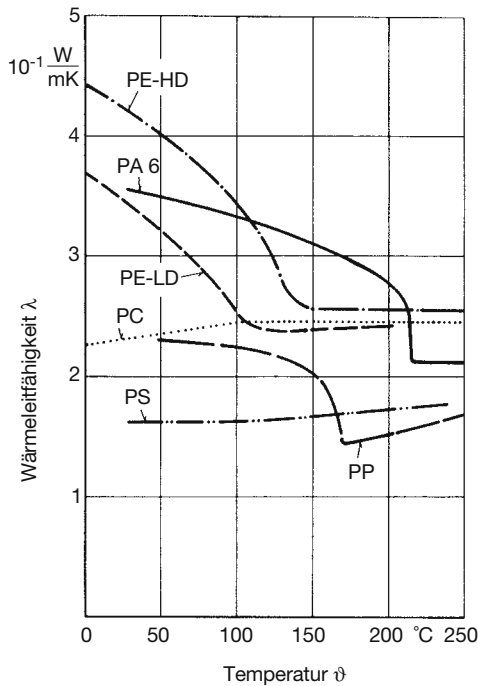


Bild 3.3
Wärmeleitfähigkeit verschiedener Thermoplaste

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:

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

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

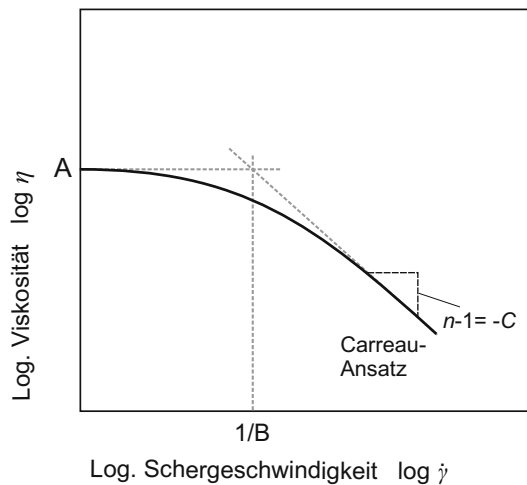


Bild 3.11 Beschreibung einer Viskositätskurve mit dem Carreau-Modell

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).

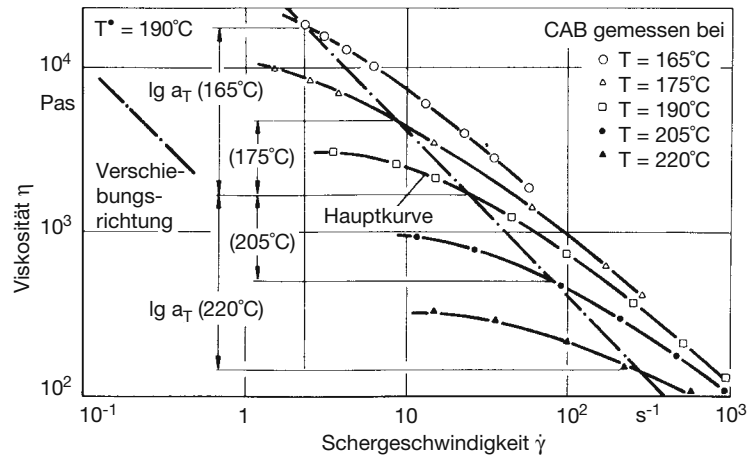


Bild 3.12 Viskositätsfunktionen bei verschiedenen Temperaturen (Verschiebungsprinzip: Temperaturverschiebungsfaktor $a_T [T]$)

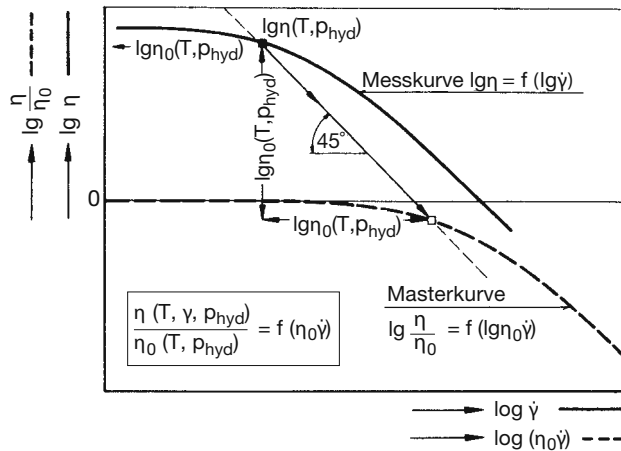


Bild 3.13 Temperatur- und druckinvariante Viskositätsfunktion

■ 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 *Thermoplasten* weit stärker als bei den *Duroplasten* oder den *faserverstärkten Kunststoffen* ausgeprägt. Für die Beurteilung des mechanischen Werkstoffverhaltens der Kunststoffe ist daher die übliche Angabe von Festigkeitswerten, wie der *Zugfestigkeit*, oder von elastischen Kenngrößen, wie dem *Elastizitätsmodul*, 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 *einachsiger* und *zweiachsiger Belastung*, 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 *Biege-, Druck- und Scher- bzw. Schubbeanspruchung* ist trotz quasi-einachsiger Kraftwirkung mit Überlagerung von Spannungen im Werkstoff insbesondere bei *anisotrop* 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 *Spannungs-Dehnungs-Diagramm* ausgedrückt werden kann.

4.2.1 Kurzzeit-Verhalten

- Kurzzeitzugversuche** Für die *Dimensionierung* von Kunststoffserzeugnissen 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 *Beanspruchungsgeschwindigkeit* so gewählt, dass eine zügig wachsende Spannung oder Verformung derart eintritt, dass der charakteristische Werkstoffkennwert, in der Regel *zerstö-*

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.

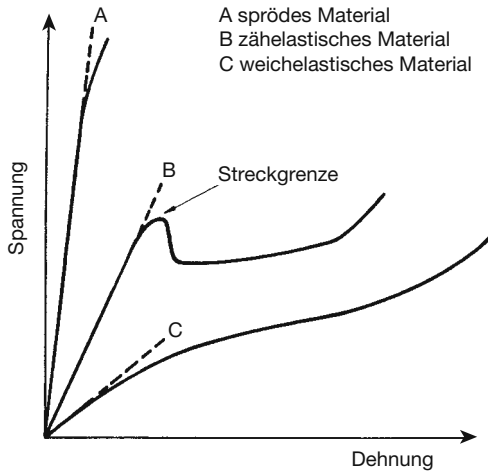


Bild 4.4
Grundformen von Spannungs-Dehnungs-Kurven

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

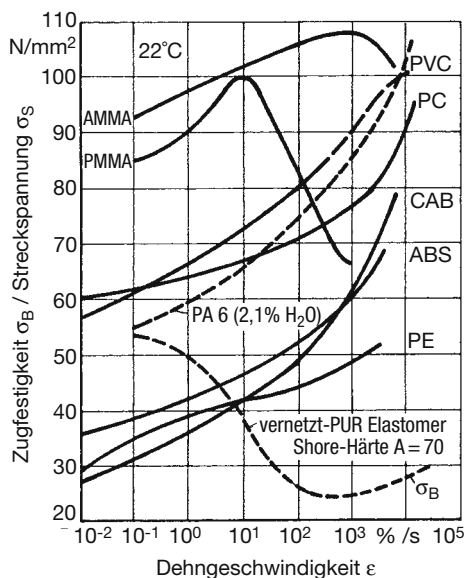


Bild 4.5
Abhängigkeit der Zugfestigkeit bzw. der Streckspannung von der Dehngeschwindigkeit (nach Oberbach)

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	0	-	-	+	+	+	0	-	+
EP-Harze	+	-	-	+	0	+	0	+	+
vernetzte Polyurethane	0	-	0	+	-	+	0	+	0
elastische Polyurethane	+	-	-	0	0	+	-	-	+
Silikonharze	+	-	-	+	+	0	-	0	+
Harnstoffharz-Pressmasse	0	-	-	+	0	+	+	+	+
Melaminharz-Pressmasse	0	-	-	+	-	+	+	+	+
Phenolharz-Pressmasse	+	-	-	+	-	+	+	+	+

+ = beständig 0 = 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).

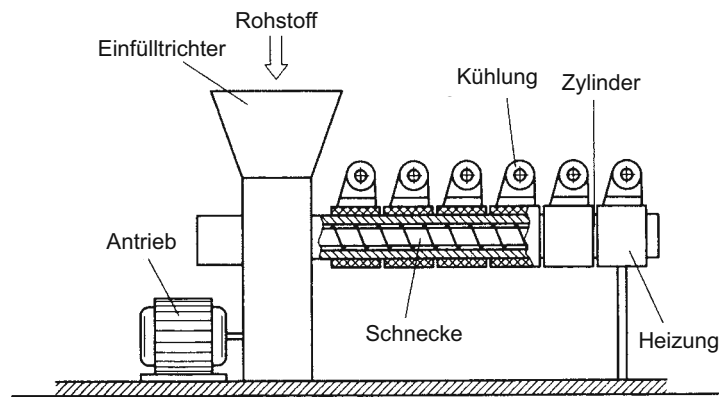


Bild 6.2 Prinzipdarstellung eines Extruder

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.

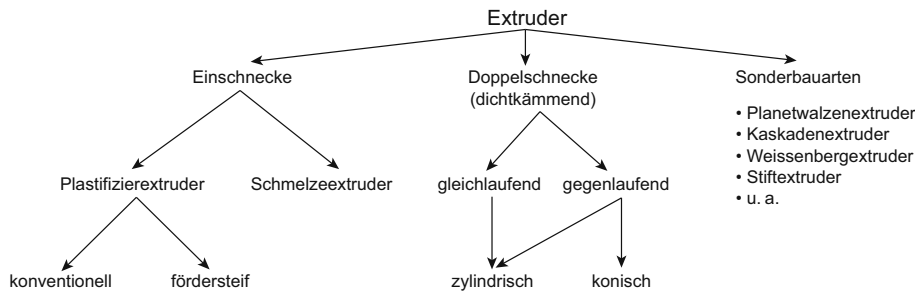


Bild 6.3 Einteilung der Extrudertypen

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.

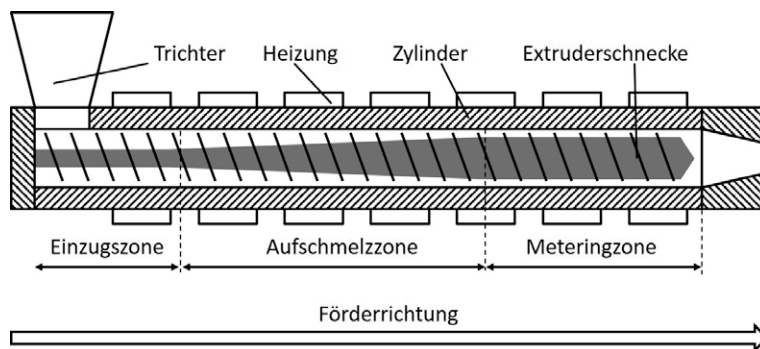


Bild 6.4 Schematische Darstellung des konventionellen Einschneckenextruders

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 Schnecken-geometrien.

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.

Schmelzeextruder

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

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

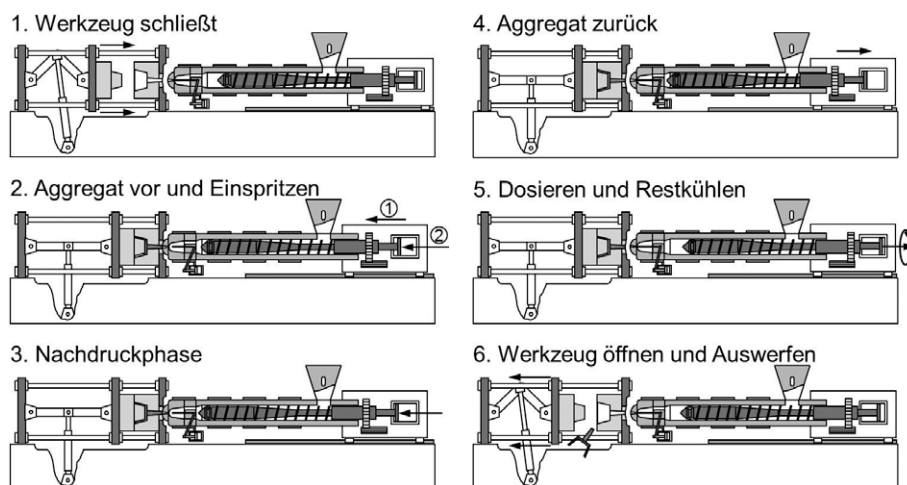


Bild 6.36 Verfahrensablauf beim Spritzgießen

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).

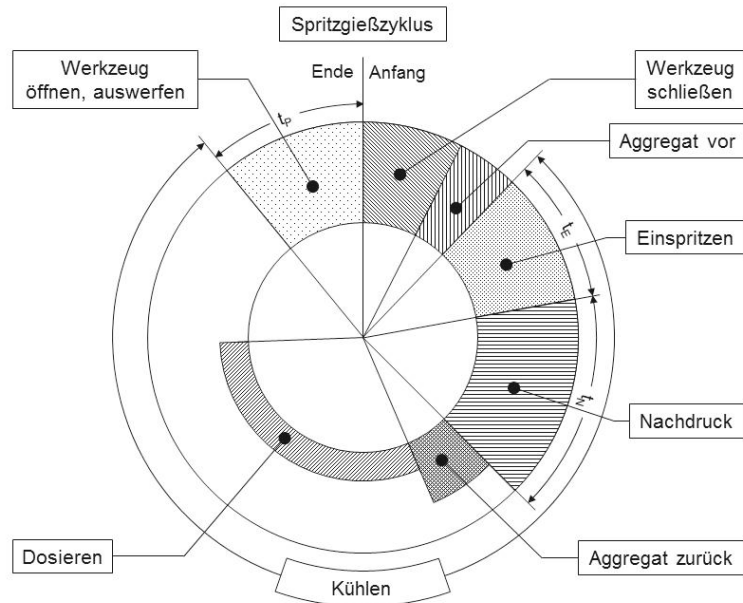


Bild 6.37 Spritzgießzyklus

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 *Abluftzeit* (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 Klebfilmdicke.

- **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 unge-schränkt und hohlgeschliffen sein müssen (Bild 7.28). Bei dünnen Tafeln und har-ten Werkstoffen ist eine kleine *Zahnteilung* erforderlich. Der Antrieb der Kreis-sägen ist stärker zu dimensionieren als bei der Holzbearbeitung. Richtwerte für das Sägen von Kunststoffen enthält Tabelle 7.4.

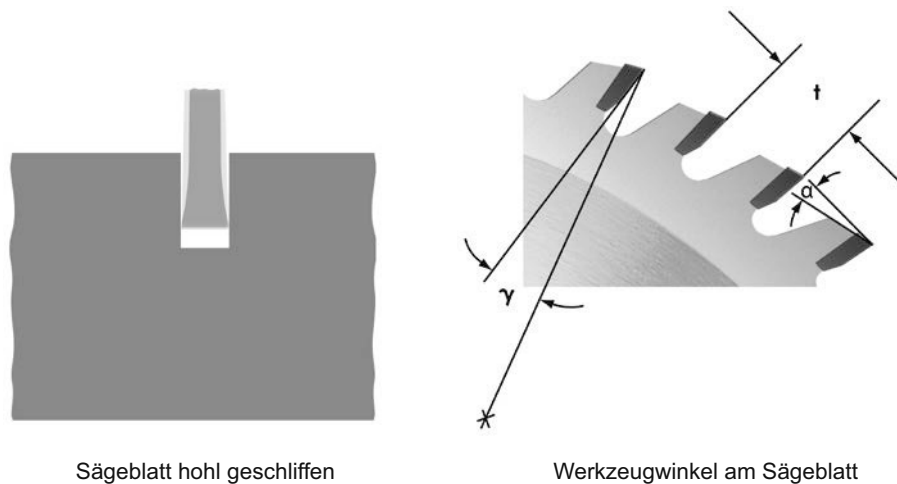


Bild 7.28 Zahngestaltung und Werkzeugwinkel bei Sägeblättern

Der Säge Tisch soll beim Sägen, besonders bei spröden Kunststoffen, so eingestellt sein, dass die Zähne nur gering über die Oberfläche der zu sägenden Platte hinaus-ragen. 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 Bandsägeblät-tern sind die Zähne im Allgemeinen leicht geschränkt, um das Verschmieren der Zahn-lücken durch Späne zu vermeiden. Die gegenseitigen Beziehungen zwischen den optimalen Zahnteilungen, den Schnittgeschwindigkeiten und den Material-dicken sind von der Art des Kunststoffes abhängig. Genaue Angaben darüber befin-den sich in Tabelle 7.4.

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

Kunststoffe	Kurz- zeichen	Werk- zeug	α	γ_K	γ_B	t	v_K	v_B
Duroplaste	Organische Füllstoffe Schichtpressstoffe und Pressstoffe	SS	30 bis 40	5 bis 8	5 bis 8	4 bis 8	bis 3000	bis 2000
		HgW GFK	10 bis 15	3 bis 6		8 bis 18	bis 5000	
Thermoplaste	Anorganische Füllstoffe	HM					1000 bis 2000	300
		Diamant	Diamantkorn Z					
	Polymethylmethacrylat und Copolymere	PMMA AMMA	30 bis 40 SS 10 bis 15 HM	0 bis (-)4 0 bis 5	0 bis 8	2 bis 8	Bei spröden Werkstoffen kleine Zahnteilung wählen	bis 3000
	Polystyrol und Styrol- Acrylnitril-Copolymere	PS SAN						
	Acrylnitril-Butadien Styrolcopolymere	ABS						
	Styrol-Butadien- Copolymere	SB						
	Polyoxymethylen, Polyacetal	POM						
	Polycarbonat	PC						
	Polyfluorethylen	PTFE						
	Polyvinyl Idor hart und VC-Copolymere	PVC CA						
	Celluloseester	CAB						
	Polyolefine	PE, PP						
	Polyamide	PA						

 v = Schnittgeschwindigkeit in m/min

K = Index für Kreissägen

B = Index für Bandsägen

Hp = Hartpapier

HgW = Hartgewebe

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 Schneidezahl klein bleiben. Die größten Schnittleistungen sind bei hohen Oberflächengüten mit *Einschneidenwerkzeugen* zu erreichen. Für plane Flächen ist das *Stirnfräsen* wirtschaftlicher als das Umfangsfräsen.

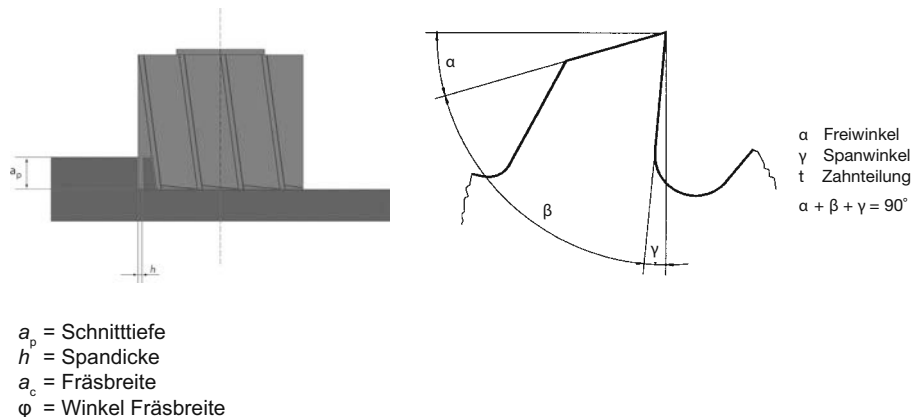


Bild 7.29 Werkzeugwinkel bei Fräsen

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		Kurz- zeichen	Werk- zeug	α	γ	v_c
Duroplaste	Organische Füllstoffe	Hp Hgw GFK	SS HM	bis 15 bis 10	15 bis 25 5 bis 15	bis 80 bis 1000
	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				
	Acrylnitril-Butadien Styrolcopolymere	ABS				
	Styrol-Butadien-Copolymere	SB				
	Polyoxymethylen, Polyacetal	POM		5 bis 10	bis 10	bis 400
	Polycarbonat	PC		5 bis 10	bis 10	bis 1000
	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/minDer 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 *Schwabbelscheiben* 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° bis 90° . Werkzeugwinkel bei Wendelbohrern sind in Bild 7.30 dargestellt. Genauere Angaben über die Schneidengeometrie sind werkstoffabhängig in Tabelle 7.6 aufgeführt.

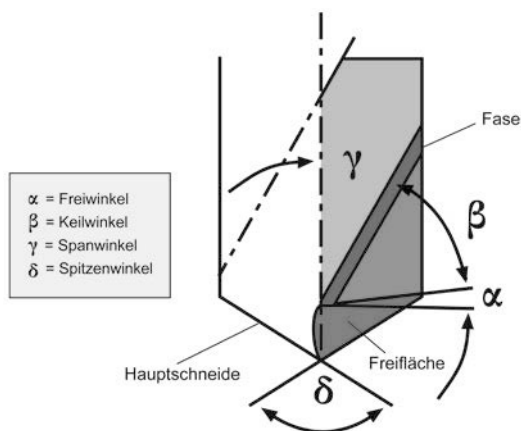
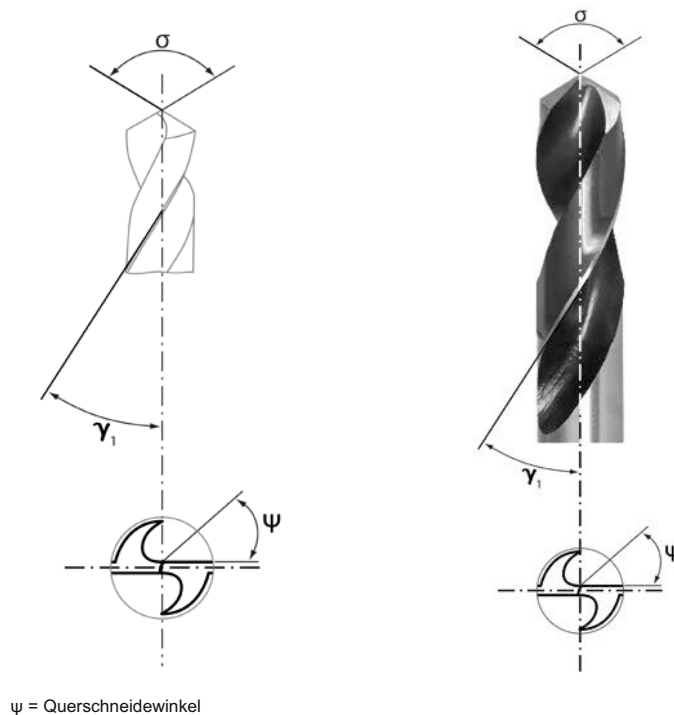


Bild 7.30
Werkzeugwinkel bei Wendelbohrern

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

Kunststoffe	Kurz- zeichen	Werk- zeug	α	γ	φ	η	s
Duroplaste	Schichtpressstoffe	SS	6 bis 8	6 bis 10	100 bis 120	30 bis 40	0,04 bis 0,6 je nach Bohrer- messer und Füllstoff
	Organische Füllstoffe	HgW	6 bis 8	6 bis 10	100 bis 120	100 bis 120	
	GFK						
Thermoplaste	Anorganische Füllstoffe	HM Diamant	6 bis 8	0 bis 6	80 bis 100	20 bis 40	0,1 bis 0,5 0,1 bis 0,5 0,1 bis 0,5 0,1 bis 0,5 0,1 bis 0,5 0,1 bis 0,5 0,2 bis 0,5 0,1 bis 0,3 0,1 bis 0,5 0,2 bis 0,5
	Polymethylmethacrylat und Copolymere	PMMA AMMA	3 bis 8	0 bis 4	60 bis 90	20 bis 60	
	Polystyrol und Styrol- Acrylnitril-Copolymere	PS SAN	3 bis 8	3 bis 5	60 bis 90	20 bis 60	
	Acrylnitril-Butadien Styrolcopolymere	ABS	5 bis 8	3 bis 5	60 bis 90	30 bis 80	
	Styrol-Butadien- Copolymere	SB	8 bis 10	3 bis 5	60 bis 75	30 bis 80	
	Polyoxymethylen, Polyacetal	POM	5 bis 8	3 bis 5	60 bis 90	50 bis 100	
	Polycarbonat	PC	5 bis 8	3 bis 5	60 bis 90	50 bis 120	
	Polyfluorethylen	PTFE	16	3 bis 5	130	100 bis 300	
	Polyvinylchlorid hart und VC-Copolymere	PVC CA	8 bis 10	3 bis 5	80 bis 110	30 bis 80	
	Celluloseester	CAB					
	Polyolefin	PE, PP	10 bis 12	3 bis 5	60 bis 90	50 bis 100	
	Polyamid	PA					

 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.

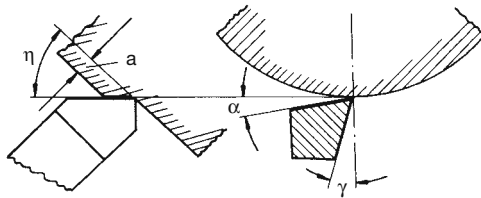


Bild 7.32
Werkzeugwinkel bei Drehstählen

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

v_c = Schnittgeschwindigkeit in m/min
 c_f = Vorschub in mm/U
 a_p = Spantiefe in mm
 Hp = Hartpapier
 Hgw = Hartgewebe
 GFK = Glasfaserverstärkte Kunststoffe
 * 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

■ 8.1 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.

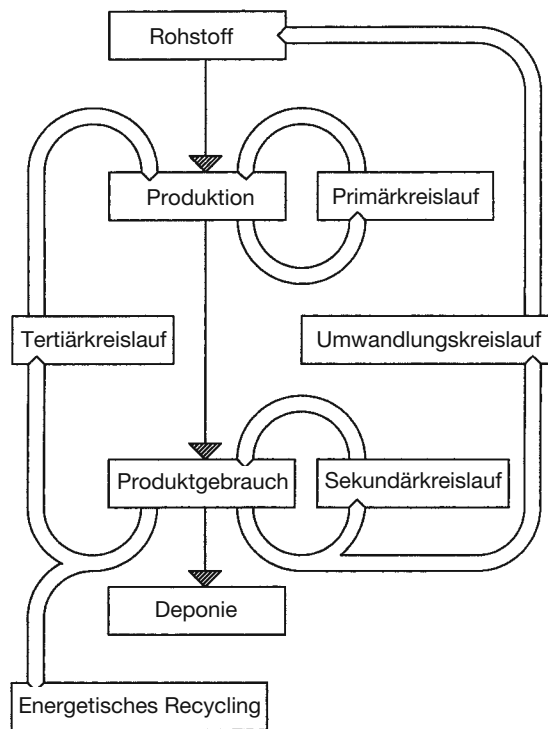


Bild 8.1 Recyclingkreisläufe

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
Abkantenschweißen 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
Angusssystem 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
Auswerferereinheit 162
Auswerferleisten 163
Auswerferplatten 162, 163
Auswerferringe 163
Auswerferstift 162
Autoklav 209

B

Bandsäge 282
Barriereigenschaften 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-Kneter 104
Butzen 133

- C**
- Carreau-Ansatz 39
 - Chemikalienbeständigkeit 85
 - chemische Reaktion 277
 - CIE-Farbtabelle 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
 - Dosiertvolumen 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 Nebenvaleanzkräfte
 14
 Hautschicht 169
 Heißabschlag 107
 Heißkanal-System 163
 Heizelement-Muffenschweißen
 262
 Heizelementschweißen 259
 Heizelement-Strahlungs-
 schweißen 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
 Hysteresese 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

Kalandern 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 78 f.
 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 abbildende
 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 86 f.
 Querkontraktionszahl 83

R

Radikal 6
 Raumnetzmoleküle 21
 Reaktionsgeschwindigkeit 89
 Reaktionsklebstoffe 276 f.
 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
 Ringfadenaug 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 34 f.
 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
 Schwabbelscheiben 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
 Tränkbild 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
 Warmgasdurchsatz 264
 Warmgasschweißen 264
 Warmgastemperatur 264
 warmhärtende Harze 204
 Wasserinjektionstechnik 170
 Wasserstoffbrücken 15
 Wechselbeanspruchungen 71
 Wechselwirkungen, elektro-
 magnetische 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
 Werkzeugtemperiertorrüh-
 tungen 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-Verschiebungs-
 regeln 64
 Zeitverformungslinien 69
 Zentrierflansch 161
 Zersetzungstemperatur 21
 zerstörendes Probenversagen 66
 Ziehschweißen 265
 Zugfestigkeit 66
 Zusatzmaterial 265
 Zusatzstoffe 63
 Zuschlagstoffe 23, 107
 Zwangsförderung 125
 zweiachsige Belastung 66
 Zweikomponentensysteme 277
 Zwischenplatte mit Kühl-
 bohrungen 162
 Zykluszeit 146
 Zylinderheizung 156