



Leseprobe

Christian Hopmann, Walter Michaeli

Einführung in die Kunststoffverarbeitung

ISBN (Buch): 978-3-446-44627-4

ISBN (E-Book): 978-3-446-44628-1

Weitere Informationen oder Bestellungen unter

<http://www.hanser-fachbuch.de/978-3-446-44627-4>

sowie im Buchhandel.

Vorwort zur siebten Auflage

Seit genau 40 Jahren begleitet das Buch „Einführung in die Kunststoffverarbeitung“ Studierende des Instituts für Kunststoffverarbeitung (IKV) an der RWTH Aachen durch ihr Studium. Mit seinem erstmaligen Erscheinen im Hanser Verlag im Jahr 1975 ist es darüber hinaus für Praktiker aus Industrie und Handwerk sowie für Studierende anderer Hochschulen zu einem verbreiteten Nachschlagewerk und Lehrbuch geworden, das die vielfältigen Möglichkeiten bei der Verarbeitung von Kunststoffen grundlegend und umfassend erläutert.

Die vorliegende siebte Auflage behält das bewährte Konzept des Buches bei. Es verzichtet weitgehend auf eine tiefe und allzu komplexe wissenschaftliche Darstellung von Werkstoffverhalten und Fertigungsverfahren, sondern versucht, mit zahlreichen Beispielen und Bildern ein grundlegendes Verständnis zu erzeugen und eine Faszination für die Möglichkeiten der Kunststofftechnik zu wecken. Mit der Neuauflage werden jüngere Entwicklungen berücksichtigt und einige Themen neu geordnet. Ein eigenes Kapitel zur Elastomerverarbeitung stellt dieses wichtige Thema nun kompakt und umfassend dar, auch der Verarbeitung von Polyurethanen wird in der vorliegenden Auflage erstmalig ein eigenes Kapitel gewidmet. Wir hoffen, dass diese Ergänzungen und Umstrukturierungen weiter zur Verständlichkeit und Zugänglichkeit der in diesem Buch beschriebenen Inhalte beitragen.

Die „Einführung in die Kunststoffverarbeitung“, die in den Lehrveranstaltungen von Prof. Dr.-Ing Georg Menges ihren Ursprung nahm, erscheint mit der vorliegenden überarbeiteten Auflage erstmalig in doppelter Autorenschaft: Im April 2011 trat Prof. Dr.-Ing. Christian Hopmann die Nachfolge von Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E. h. Walter Michaeli als Lehrstuhlinhaber und Institutsleiter des IKV an. Wir freuen uns beide sehr, dass uns dieses Buch mit seiner langen Geschichte im Hanser Verlag in die dritte IKV-Generation begleitet. Es ist weiterhin grundlegend für die Lehre am IKV und der RWTH Aachen, insbesondere für die einführende Vorlesung „Kunststoffverarbeitung I“. Auch in Zukunft soll es – vielleicht heute, in Zeiten so vielfältiger anderer Informationsmöglichkeiten, mehr denn je – als fundiertes und in sich geschlossenes Lehrbuch sowie als verlässliches und übersichtliches Nachschlagewerk für die Praxis dienen.

Die Erstellung und Überarbeitung eines solchen Buches ist ohne engagierte Unterstützung zahlreicher Helferinnen und Helfer nicht möglich. Daher danken wir unseren wissenschaftlichen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern, die Vorhandenes kritisch gesichtet, überarbeitet und ergänzt haben. Ein ganz besonderer Dank geht

an Frau Dr. Scheller-Brüninghaus, die für die Redaktion, Koordination und permanente Abstimmung mit dem Carl Hanser Verlag verantwortlich zeichnete und mit ihrem hohen Engagement einen erheblichen Beitrag zum Gelingen dieses Buches geleistet hat. Herzlich danken möchten wir zudem dem Carl Hanser Verlag für die Bereitschaft, dieses Werk erneut aufzulegen, sowie namentlich Frau Wittmann, die mit Rat und Tat geduldig die Entstehung des Werkes begleitet und maßgeblich unterstützt hat.

Aachen im August 2015

Christian Hopmann

Walter Michaeli

■ Vorwort zur sechsten Auflage

Ich freue mich, dass dieses Buch auch weiterhin eine so gute Resonanz erfährt. Vielleicht ist dies ja ein Zeichen, dass die Wissensvermittlung der Kunststofftechnik bundesweit vermehrt in den Lehrplänen der Schulen und Hochschulen Berücksichtigung findet. Ich würde dies sehr begrüßen. Eine Welt ohne Kunststoffe ist nicht mehr vorstellbar, und die Entwicklung der Kunststoffe und deren Be- und Verarbeitung schreitet unaufhaltsam voran. Dies war auch wiederum der Anlass für die Überarbeitung dieses Buches. So finden Sie in dieser Auflage neue Kapitel zur Thematik „Biopolymere“ und „Spaltimprägnierung“, ein neu entwickeltes Verfahren zur Herstellung von Leichtbauteilen, welches zukünftig vielleicht die industrielle Herstellung revolutionieren wird.

Ganz herzlich möchte ich mich bedanken bei meinen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern sowie Herrn Dipl.-Ing. Lennart Ederleh, Abteilungsleiter Extrusion und Weiterverarbeitung, Herrn Dipl.-Ing. Jörg Strohacker, Abteilungsleiter Faserverstärkte Kunststoffe, Herrn Dipl.-Ing. Oliver Grönlund, Abteilungsleiter Spritzgießen/PUR-Technologie, Frau Dipl.-Ing. Ina Michaelis, Herrn Dipl.-Ing. Henning Seidel und Herrn Dipl.-Ing. Mathias Weber für die tatkräftige Hilfe bei der Überarbeitung dieses Buches. Dank gilt besonders auch Herrn Dipl.-Ing. Leo Wolters, Abteilungsleiter Ausbildung für die redaktionelle Überarbeitung.

Dem Carl Hanser Verlag sei auch an dieser Stelle für die stets vorzügliche Kooperation bei diesem und vielen gemeinsamen Projekten gedankt.

Aachen im August 2010

Walter Michaeli

■ Vorwort zur fünften Auflage

Dieses Buch findet weiterhin vorzügliche Resonanz bei seinen Lesern. Ihnen allen sei hierfür herzlich gedankt. Gedankt sei auch für die Anregungen zur weiteren Verbesserung dieses Buches, welche gerne aufgegriffen und in diese überarbeitete Auflage eingearbeitet wurden.

Seit dem Erscheinen der letzten Auflage im Jahre 1999 haben sich einige neue und innovative Kunststoffverarbeitungsverfahren in der Praxis durchsetzen können, so dass über diese nun als „Stand der Technik“ berichtet werden kann und sie daher auch zu Recht Aufnahme in dieses einführende Buch finden. Dies sind einige Spritzgießverfahren und Verfahren aus dem Bereich der Herstellung von langfaserverstärkten Kunststoffbauteilen.

Herzlich bedanke ich mich bei meinen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern sowie Herrn Dr.-Ing. *Torsten Schmitz*, Leiter der Abteilung Extrusion und Weiterverarbeitung, Herrn Dipl.-Ing. *Michael Schlumm*, Leiter der Abteilung Faserverbundwerk-

stoffe und Herrn Dipl.-Ing. *Christoph Lettowsky*, Leiter der Abteilung Spritzgießen am IKV für ihre tatkräftige Hilfe bei der Überarbeitung dieses Buches. Dank gilt auch Frau *Ingrid Zekorn* und Frau *Georgette Nelissen* für die redaktionelle Überarbeitung.

Dem Carl Hanser Verlag sei besonders gedankt für die vorzügliche Kooperation bei diesem und vielen gemeinsamen Projekten.

Walter Michaeli

■ Vorwort zur vierten Auflage

Viele Resonanzen haben mich zu diesem Einführungsbuch in die Welt der Kunststoffverarbeitung in der Vergangenheit erreicht. Hierbei war besonders erfreulich, dass sie vornehmlich positiv waren. Aber sie waren auch hilfreich und anregend, denn sie enthielten konstruktive Hinweise zur punktuellen Verbesserung. Alle diese Anmerkungen wurden in dieser vierten Auflage aufgenommen und eingearbeitet. So möchte ich mich herzlich bei allen Kritikern für ihren der Sache dienenden konstruktiv-kritischen Beitrag bedanken.

Diese vierte Auflage wurde um ein Kapitel zum Recycling von Kunststoffen ergänzt. Dies ist heute und auch in Zukunft eine Aufgabe unserer Industrie sowie unserer Gesellschaft. Daher gehört dies auch in ein solches Einführungsbuch. Auch haben Sonderverfahren des Spritzgießens an Bedeutung zugenommen, so dass dieser Teil im Buch erweitert wurde.

Ganz herzlich bedanke ich mich bei meinem Mitarbeiter und Leiter der Abteilung Spritzgießen im IKV, Herrn Dr.-Ing. *Frank Ehrig*, für die tatkräftige Unterstützung bei der Überarbeitung des Buches. Danken möchte ich allen Mitarbeitern, die einen Beitrag zu diesem Buch beigesteuert haben sowie Frau *Ingrid Zekorn* und Frau *Georgette Nelissen* für die redaktionelle Überarbeitung.

Dank gilt auch dem Carl Hanser Verlag für die traditionell gute Kooperation in dieser Sache und in vielen weiteren Buchprojekten.

Walter Michaeli

■ Vorwort zur dritten Auflage

Viele Jahre lang hat mein Vorgänger in der Leitung des Instituts für Kunststoffverarbeitung (IKV) an der RWTH Aachen, Professor Dr.-Ing. *G. Menges*, seinen Studenten und Studentinnen mit seinem Buch „Einführung in die Kunststoffverarbeitung“

einen ersten, umfassenden Einblick in die Faszination der Kunststoffe und ihre Verarbeitungstechniken vermittelt. Er nutzte dieses Buch als Basis für seine Vorlesungsreihe „Kunststoffverarbeitung I“. Sein Buch hat sich dabei vielfach bewährt.

So wundert es auch nicht, dass Professor Menges eines Tages vom Verband Kunststoffzeugender Industrie (VKE), Frankfurt, angesprochen wurde, auf seinem Fachwissen und seinen Lehrerfahrungen aufbauend ein Buch zu schaffen, welches weiterhin die Kunststoffverarbeitung in ihrer Breite darstellt, zum Eigenstudium geeignet und auch für Nicht-Techniker und Menschen ohne wissenschaftliche Vor- und Ausbildung gut verständlich ist.

Zur Umsetzung dieser Idee lag es nahe, dies zusammen mit dem Süddeutschen Kunststoffzentrum (SKZ) in Würzburg zu machen, mit dem unser Institut eng fachlich und freundschaftlich verbunden ist.

Mit meiner Rückkehr an die RWTH Aachen zum Wintersemester 1987/1988 lagen schon erhebliche Vorarbeiten zu diesem Projekt vor, die nun in den Folgejahren mit meinen eigenen Erfahrungen in der Fortsetzung der ehemaligen Vorlesungen von Professor Menges verknüpft und abgerundet wurden.

So liegt vor dem Leser nun ein Buch, welches versucht, in gut verständlicher Form und Sprache Lernenden und Studierenden sowie Praktikern aus Industrie und Handwerk eine Einführung und einen umfassenden Überblick über die wesentlichen Kunststoffverarbeitungsprozesse, ihre Funktionsweise und verfahrenstechnischen Hintergründe zu vermitteln. Hierbei werden nach einer Einführung in die Herstellung der Kunststoffe und ihrer Eigenschaften die wesentlichen, ihr Verarbeitungsverhalten beeinflussenden Größen aufgezeigt und die Grundprinzipien der wichtigsten Kunststoffverarbeitungs- und Weiterverarbeitungsverfahren dargestellt. Ein Stichwortverzeichnis dient der schnelleren Orientierung bei seiner Nutzung als Nachschlagewerk; auch wurde wesentlicher Wert auf die umfassende Darstellung weiterführender Literatur gelegt.

Wie eingangs dargelegt, ist dieses Buch ein Gemeinschaftswerk. Besonderer Dank gilt zunächst Herrn Professor Menges für die Vorarbeiten und die Tatsache, dass wir hierauf aufbauen durften. Weiterhin sei allen Mitarbeitern des SKZ und des IKV für ihren Beitrag zum Gelingen dieses Buches ganz herzlich gedankt.

Der VKE unterstützte uns großzügig – fachlich und finanziell – bei der Realisierung dieser Buchidee. Ihm, seinen Mitarbeitern und hierbei besonders Herrn Abele, sei besonders herzlich gedankt.

Dank gilt auch dem Carl Hanser Verlag, der unseren Text letztlich erst zu einem Buch werden ließ, von dem ich hoffe, dass seine Leser viel aus ihm lernen mögen und dabei auch Spaß haben.

Aachen, im Juli 1992

Prof. Dr.-Ing. W. Michaeli

Inhalt

Vorwort zur siebten Auflage	V
Vorwort zur sechsten Auflage	VII
Vorwort zur fünften Auflage	VII
Vorwort zur vierten Auflage	VIII
Vorwort zur dritten Auflage	VIII
 Kurzzeichen für Polymere	 XI
 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
3.3	Elastische Eigenschaften von Polymerschmelzen	47
3.3.1	Normalspannungen	48
3.3.2	Zeitabhängiges Verhalten	48
3.4	Abkühlen aus der Schmelze	48
3.4.1	Amorph erstarrende Thermoplaste	49
3.4.2	Teilkristallin erstarrende Thermoplaste	49
3.4.3	Nukleierung	52
3.4.4	Bestimmung des Kristallisationsgrades	53
3.5	Morphologie erstarrter Thermoplaste	54
3.5.1	Amorph erstarrte Thermoplaste	55
3.5.2	Teilkristallin erstarrte Thermoplaste	57
	Literatur	59
4	Werkstoffkunde der Kunststoffe	61
4.1	Allgemeines zum Werkstoffverhalten	61
4.2	Spannungs-Dehnungs-Verhalten	64
4.2.1	Kurzzeit-Verhalten	64
4.2.2	Stoßartige Beanspruchung	66
4.2.3	Verhalten bei langzeitiger und ruhender Beanspruchung	67
4.2.4	Schwingende Beanspruchung	69
4.3	Eindruck-, Verschleiß- und Reibverhalten	70
4.3.1	Härte	70
4.3.2	Abrieb	73
4.3.3	Reibverhalten	73
4.4	Elektrisches Verhalten	74
4.4.1	Dielektrisches Verhalten	74
4.4.2	Elektrische Leitfähigkeit	76
4.4.3	Durchschlagfestigkeit	76
4.4.4	Elektrostatische Aufladung	77
4.5	Optisches Verhalten	78
4.5.1	Brechung und Dispersion	78
4.5.2	Transparenz	78
4.5.3	Glanz	79
4.5.4	Farbe	79
4.6	Akustisches Verhalten	81

4.7	Verhalten gegen Umwelteinflüsse	83
4.7.1	Widerstandsfähigkeit gegen Medien	83
4.7.2	Spannungsrisssbeständigkeit	85
4.7.3	Diffusion und Permeation	86
4.7.4	Bewitterung	87
4.7.5	Biologisches Verhalten	88
4.7.6	Brandverhalten	88
4.8	Gebrauchstauglichkeit und Qualitätssicherung	89
	Literatur	90
5	Aufbereitung von Kunststoffen	97
5.1	Einleitung	97
5.2	Aufgaben in der Aufbereitung	97
5.2.1	Lagern und Fördern	98
5.2.2	Dosieren	98
5.2.3	Mischen	100
5.2.3.1	Diskontinuierliche Aufbereitungsmaschinen	100
5.2.3.2	Kontinuierliche Aufbereitungsmaschinen	102
5.2.4	Granulieren	105
5.3	Zuschlagstoffe	105
5.3.1	Verarbeitungshilfsmittel	105
5.3.2	Stabilisatoren	106
5.3.3	Antistatika	106
5.3.4	Elektrisch leitfähige Füllstoffe	107
5.3.5	Flammschutzmittel	107
5.3.6	Treibmittel	107
5.3.7	Festigkeit und Steifigkeit herabsetzende Zuschlagstoffe	107
5.3.8	Festigkeit und Steifigkeit erhöhende Zuschlagstoffe	108
	Literatur	108
6	Verarbeitungsverfahren für Kunststoffe	109
6.1	Extrusion	109
6.1.1	Der Extruder	110
6.1.1.1	Der Einschneckenextruder	111
6.1.1.2	Die Schnecke	114
6.1.1.3	Konventionelle Einschneckenplastifizierextruder	116
6.1.1.4	Der fördersteife Einschneckenextruder	117
6.1.1.5	Der Plastifiziervorgang im Einschneckenextruder	119
6.1.1.6	Der Doppelschneckenextruder	121
6.1.1.7	Extruderzylinder	123
6.1.2	Weitere Anlagenkomponenten	124
6.1.2.1	Extrusionswerkzeug	124
6.1.2.2	Kalibrierung/Kühlung und Abzug	127
6.1.2.3	Anlagenbeispiele	128
6.1.3	Coextrusion	129

6.2	Extrusionsblasformen und Streckblasen	130
6.2.1	Extrusionsblasformen	131
6.2.1.1	Der Verfahrensablauf	131
6.2.1.2	Die Maschine	133
6.2.1.3	Das Mehrfachblasformen	138
6.2.1.4	Coextrusionsblasformen	138
6.2.1.5	3D-Blasformen	139
6.2.1.6	Saugblasen	139
6.2.2	Streckblasen	140
6.2.2.1	Vorformlingsherstellung	141
6.2.2.2	Verfahren aus erster und zweiter Wärme	141
6.2.2.3	Vor- und Nachteile des Streckblasverfahrens	142
6.3	Spritzgießen	142
6.3.1	Maschine und Verfahrensablauf	142
6.3.1.1	Verfahrensablauf	143
6.3.1.2	Maschinenaufbau	144
6.3.1.3	Kenndaten der Maschine	146
6.3.2	Baugruppen	147
6.3.2.1	Plastifiziereinheit	147
6.3.2.2	Schließeinheit	155
6.3.2.3	Werkzeug	158
6.3.2.4	Werkzeugtemperierung	162
6.3.2.5	Maschinenbett und Steuereinheit	163
6.3.3	Sonderverfahren	163
6.3.3.1	Thermoplast-Schaumspritzgießen (TSG)	164
6.3.3.2	Mehrkomponenten-Spritzgießen	167
6.3.3.3	Kaskadenspritzgießen	170
6.3.3.4	Spritzprägen	171
6.3.3.5	Hinterspritztechnik	173
6.3.3.6	Schmelzkerntechnik	174
6.4	Herstellung von Formteilen aus duroplastischen Pressmassen	174
6.4.1	Der Werkstoff „Duroplastische Pressmasse“	174
6.4.2	Das Pressverfahren	176
6.4.3	Verfahrensvarianten	179
6.5	Elastomerverarbeitung	180
6.5.1	Rohstoffe und Mischungen	181
6.5.1.1	Kautschukpolymere	181
6.5.1.2	Verstärkende Füllstoffe	182
6.5.1.3	Vernetzungssystem	183
6.5.2	Mischungsherstellung	184
6.5.3	Formgebung von Elastomeren	185
6.5.3.1	Extrusion und kontinuierliche Vulkanisation von Elastomeren	185
6.5.3.2	Herstellung elastomerer Formteile	188
6.6	Verarbeitung von Polyurethanen	190
6.6.1	Schaumbildungsprozess	192

6.6.2	Anlagentechnik zur Verarbeitung reaktiver Polyurethane	193
6.6.3	RIM-Verfahren	197
6.7	Faserverstärkte Kunststoffe	198
6.7.1	Materialien	200
6.7.2	Bauteilkonstruktion und -auslegung	203
6.7.3	Verarbeitungsverfahren für Faserverbundkunststoffe	204
6.7.3.1	Handlaminierverfahren	204
6.7.3.2	Faserspritzen	205
6.7.3.3	Prepregverarbeitung, Tapelegen, Autoklavieren	206
6.7.3.4	Faserwickeln	206
6.7.3.5	Pultrusionsverfahren	208
6.7.3.6	Harzinjektionsverfahren (Resin Transfer Moulding, RTM)	209
6.7.3.7	Harzinfusionsverfahren (Resin Infusion, RI)	211
6.7.3.8	Spaltimprägnierverfahren	212
6.7.3.9	Umformen endlosfaserverstärkter Thermoplaste	214
6.7.3.10	Pressen langfaserverstärkter Kunststoffe	217
6.7.4	Prozesssimulation bei der Pressverarbeitung	224
6.8	Kalandrieren	225
6.9	Verarbeitung durch Gießen	230
6.9.1	Gießen	231
6.9.2	Schüttintern	232
6.9.3	Schleudergießen (Rotationsformen)	233
6.9.4	Foliengießen	234
6.9.5	Umgießen	234
6.9.6	Imprägnieren	234
	Literatur	235
7	Weiterverarbeitungstechniken für Kunststoffe	243
7.1	Thermoformen	243
7.1.1	Maschinen	244
7.1.2	Verfahrensschritte	246
7.2	Schweißen von Kunststoffen	251
7.2.1	Heizelementschweißen (HE-Schweißen)	255
7.2.1.1	Direkte Heizelement-Schweißverfahren	255
7.2.1.2	Indirekte HE-Schweißverfahren	259
7.2.2	Warmgasschweißen	260
7.2.2.1	Fächelschweißen (Runddüse)	261
7.2.2.2	Ziehschweißen (Schnellschweißen)	261
7.2.2.3	Warmgas-Überlappschweißen	261
7.2.2.4	Extrusionsschweißen	262
7.2.2.5	Heißgasschweißen	262
7.2.3	Reibschweißverfahren	263
7.2.3.1	Verfahren mit äußerer Reibung	263
7.2.3.2	Verfahren mit innerer Reibung	264
7.2.4	Strahlungsschweißverfahren	266
7.2.4.1	Heizelementstrahlungsschweißen	266

7.2.4.2	Infrarotschweißen	267
7.2.4.3	Laserstrahlschweißen	267
7.2.4.4	Laserdurchstrahlschweißen	267
7.2.5	Induktionsschweißen (Elektromagnetisches Schweißen)	270
7.3	Kleben von Kunststoffen	270
7.3.1	Mechanismus der Klebung	271
7.3.2	Einteilung der Klebstoffe	272
7.3.2.1	Physikalisch abbindende Klebstoffe	273
7.3.2.2	Chemisch abbindende Klebstoffe (Reaktionsklebstoffe)	273
7.3.3	Werkstoffeinflüsse auf die Klebbarkeit von Kunststoffen	274
7.3.4	Verfahrensablauf beim Kleben	275
7.4	Mechanische Bearbeitung	277
7.4.1	Sägen	278
7.4.2	Fräsen	280
7.4.3	Schleifen und Polieren	281
7.4.4	Bohren	282
7.4.5	Drehen	284
Literatur		286
8	Recycling von Kunststoffen	289
8.1	Einleitung	289
8.2	Aufbereitung von Kunststoffabfällen	293
8.3	Werkstoffliche Verwertung von Kunststoffabfällen	295
8.4	Rohstoffliche Verwertung	298
8.5	Energetische Verwertung	300
8.6	Abschließende Bemerkungen	301
Literatur		301
Index		305

2

Aufbau und Einteilung der Kunststoffe

■ 2.1 Aufbau der Kunststoffe

Das Wort „Kunststoff“, in dem die Definition „künstlicher Stoff“ steckt, wurde für eine zunächst noch nicht klar definierte Stoffgruppe erstmalig von der Zeitschrift Kunststoffe (gegründet 1911) eingeführt und so im deutschen Sprachraum festgeschrieben.

Die ersten Kunststoffe wurden in der zweiten Hälfte des letzten Jahrhunderts durch chemische Umwandlung hochmolekularer Naturstoffe entwickelt (Galalith, Celluloid, Kunstseiden), zum Teil als Ersatz der teuren und hochwertigen Naturprodukte. 1905 gelang es *Baekeland*, die Harzbildung aus Formaldehyd und Phenolen so zu steuern, dass die dabei gebildeten Produkte als Werkstoffe verarbeitet werden konnten. Die ersten Versuche zur Herstellung eines synthetischen Elastomers („Gummi“, Methyl-Kautschuk) – wiederum als Ersatz des durch die Blockade im 1. Weltkrieg nicht mehr zur Verfügung stehenden Naturkautschuks – wurden in Deutschland unternommen. Die Entwicklung der Kunstfasern geht vor allem auf Arbeiten von *Carothers* (USA) zurück, dem es gelang, aus Dicarbonsäuren und Diaminen Polyamide zu erhalten, welche sich zu Fasern verspinnen ließen.

erste Kunststoffe

Durch das Fehlen jeglicher Grundkenntnisse über die Struktur dieser Werkstoffe wurde allerdings zunächst ein echter Fortschritt verhindert. Lange Zeit war man allgemein der Ansicht, dass auch Stoffe wie Cellulose, Gummi oder Vinylpolymere im Wesentlichen aus Molekülen von relativ niedriger Molekülmasse bestehen würden. Man sah die besonderen Eigenschaften dieser Materialien als eine Folge der Zusammenlagerung der Moleküle zu Kolloidteilchen, sogenannten Micellen, an.

Erst durch die energische Pionierarbeit des deutschen Chemikers *Hermann Staudinger*, der 1922 den Begriff „*Makromolekül*“ einführte, begann der eigentliche Fortschritt. Staudinger erkannte, dass die Hochpolymeren aus Molekülen von sehr hoher Molmasse, den sogenannten Makromolekülen, aufgebaut sind, in welchen die einzelnen Kohlenstoffatome untereinander in genau derselben Weise miteinander verknüpft sind wie in irgendeinem niedermolekularen organischen Stoff. Für diese Arbeiten erhielt Staudinger 1953 den Nobelpreis. Der „Normenausschuss Kunststoffe“ schlug später für diese Werkstoffklasse folgende Begriffsbestimmung vor:

Makromoleküle

„Kunststoffe sind Materialien, deren wesentliche Bestandteile aus solchen makromolekularen organischen Verbindungen bestehen, die synthetisch oder durch Umwand-

Definition: „Kunststoff“

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.

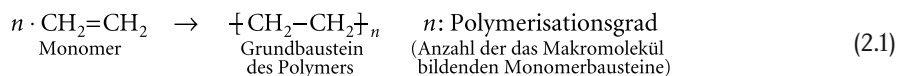
Die niedermolekularen Ausgangsmoleküle bezeichnet man bei allen Reaktionsvorgängen als *Monomere*.

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:



Schweben gebracht und anschließend die Dichte der Flüssigkeit gemessen. Es gilt dann: Dichte der Probe = Dichte der Flüssigkeit.

Eine andere geläufige Methode ist die *Pyknometrie*. Der Probekörper wird dabei in eine gasdichte Kammer eingebracht. Durch Kompression und Expansion eines Gases wird das Verdrängungsvolumen gemessen. Zusätzlich wird die Masse gewogen, woraus die Dichte berechnet werden kann. Das Messprinzip eignet sich auch für komplex geformte Körper und Schäume.

Pyknometrie

3.1.2 Thermische Ausdehnung

Kunststoffe dehnen sich bei Erwärmung tendenziell deutlich stärker aus als andere Materialien. Die Ursache dafür liegt in der molekularen Struktur und insbesondere in der starken Temperaturabhängigkeit der relativ schwachen Nebenvaleanzkräfte. Geringfügige Temperaturvariationen führen zu deutlichen Schwankungen im Abstand der Molekülketten zueinander. Es bestehen phänomenologische Zusammenhänge zwischen dem Wärmeausdehnungskoeffizient und der Schmelztemperatur bzw. dem E-Modul: Hohe Wärmeausdehnungskoeffizienten korrelieren meist mit niedrigen Schmelztemperaturen und niedrigen E-Moduln.

Besonders Thermoplaste vergrößern ihre Ausdehnung bei Erwärmung sehr stark. Der *Wärmeausdehnungskoeffizient* α von Polyethylen oder Polypropylen ($\alpha \approx 200 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) übertrifft den von Eisen ($\alpha \approx 12 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) oder Aluminium ($\alpha \approx 24 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) um das 16- bzw. 8-fache. Um diese Eigenschaft von Kunststoffen bei der Konstruktion von präzisen Teilen zu kompensieren, werden sie häufig mit Fasern gefüllt. Die Wärmeausdehnung wird dadurch auf den Wert von Metallen herabgesetzt. Beim Füllen des Kunststoffes mit Kohlenstofffasern kann der Wärmeausdehnungskoeffizient in Längsrichtung der Fasern sogar ein negatives Vorzeichen bekommen. Mit anderen Worten, dieser Werkstoff kann sich bei Erwärmung zusammenziehen. Bei Duroplasten, aber auch bei einigen Thermoplasten (Polystyrol, Polyvinylchlorid) liegen die Ausdehnungskoeffizienten mit $70 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1} \leq \alpha \leq 100 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ nicht ganz so hoch wie bei Polyethylen und Polypropylen.

Füllstoffe reduzieren
Wärmeausdehnung

Die Wärmeausdehnung lässt sich mithilfe der *thermomechanischen Analyse* (TMA) in Abhängigkeit von der Temperatur messen. Bild 3.2 zeigt den prinzipiellen Aufbau der TMA. Die beiden Kernstücke dieses Messverfahrens sind der Ofen sowie der Wegaufnehmer. Eine planparallele Probe wird auf eine geschliffene Quarzglasfläche gelegt und der Messstempel aufgesetzt. Die Gewichtskraft des Stempels wird mit einigen μN so niedrig wie möglich gewählt, um eine unerwünschte Deformation der Probe durch den Stempel bzw. dessen Eindringen zu vermeiden. Die Ofentemperatur wird (zumeist) linear erhöht, die Dimensionsänderung der Probe auf den Stempel übertragen und im Wegaufnehmer erfasst. Als Ergebnis wird die Dimensionsänderung der Probe über der Probentemperatur T aufgetragen. Alternativ lässt sich unmittelbar der lineare Ausdehnungskoeffizient α über der Temperatur auftragen. Bei Kunststoffen kann mit der Methode auch die Glasübergangstemperatur T_g ermittelt werden, da der lineare Ausdehnungskoeffizient oberhalb dieser Temperatur deutlich schneller wächst.

TMA

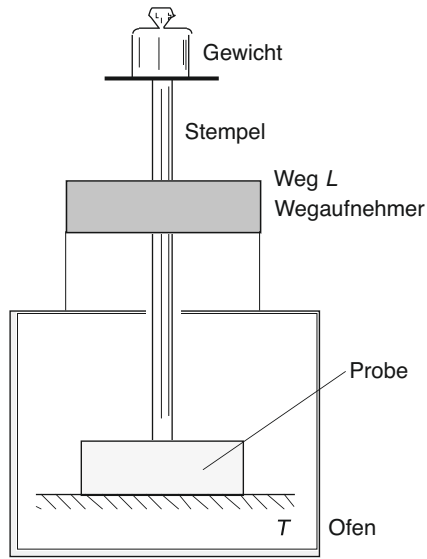


Bild 3.2
Prinzip der TMA (Thermomechanische Analyse)

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.

■ 4.4 Elektrisches Verhalten

4.4.1 Dielektrisches Verhalten

Dielektrizität Die elektrischen Eigenschaften von Kunststoffen werden hauptsächlich von der Beweglichkeit der jeweiligen molekularen Bausteine beeinflusst. Die relative *Dielektrizitätskonstante* ε_r ist für diese Eigenschaften die kennzeichnende Größe. Sie gibt an, um welchen Faktor sich die Kapazität, verglichen mit der Kapazität im Vakuum, eines Kondensators ändert, wenn man den Kunststoff zwischen die Platten eines Kondensators bringt:

$$C = \varepsilon_r \cdot C_0 = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \frac{A}{d} \quad (4.1)$$

mit:

C_0 Kapazität im Vakuum
 ε_0 Dielektrizitätszahl für Vakuum
 A Fläche des Kondensators
 d Abstand der Platten

Polarisation Die Änderung der Kapazität eines Kondensators durch Einschieben eines Kunststoffes (*Dielektrikums*) ist durch Polarisationsladungen, die sich im elektrischen Feld des Kondensators ausbilden, begründet. Die Polarisation kann nach verschiedenen Mechanismen je nach Aufbau des Kunststoffes ablaufen.

Elektronenpolarisation *Elektronenpolarisation:* Völlig unpolare Kunststoffe, z. B. Polyethylen, Polyisobutylene, Polytetrafluorethylen, können nur eine Elektronenpolarisation aufweisen. Die Elektronenhülle der Atome wird durch das elektrische Feld verschoben. Die Dielektrizitätskonstante ε_r hängt bei der reinen Elektronenpolarisation mit dem optischen Brechungsindex n wie folgt zusammen:

$$\varepsilon_r = n^2 \quad (4.2)$$

Die Dielektrizitätskonstante ist bei reiner Elektronenpolarisation praktisch von der Frequenz unabhängig und fällt mit der Temperatur geringfügig, da wegen der Wärmeausdehnung die Zahl der polarisierbaren Teilchen pro Volumenelement abnimmt.

Ionenpolarisation *Ionenpolarisation:* Ionenpolarisation findet in Polymeren praktisch nicht statt.

Dipolpolarisation *Dipolpolarisation:* Bei polaren Kunststoffen können sich nicht alle Moleküle im elektrischen Feld ausrichten. Die Polarisation ist auf eine *Orientierung* von Kettensegmenten bzw. Seitenketten zurückzuführen. Es können sich auch Dipole unabhängig von der Hauptkette orientieren, wenn eine Rotation in der Kette möglich ist. Die Dielektrizitätskonstante ist bei polaren Kunststoffen größer als bei unpolaren.

In einem elektrischen Wechselfeld führt die Bewegung der Molekülteile zu innerer Reibung und damit zu einer Erwärmung der Kunststoffe. Bei der reinen Elektronenpolarisation ist diese innere Reibung sehr gering. Die innere Reibung wird durch den *Verlustfaktor* $\tan \delta$ gekennzeichnet. Der Verlustfaktor beschreibt die Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung. Beim verlustfreien Kondensator hat man den Verlustfaktor $\tan \delta = 0$ und damit einen reinen Blindstrom, d. h. der Strom eilt der Spannung um 90° voraus. Der Verlustfaktor ist frequenzabhängig. Im *Dispersionsgebiet* ist die Frequenzabhängigkeit besonders stark ausgebildet (Bild 4.13). Teilkristalline Kunststoffe, die eine amorphe und eine kristalline Phase aufweisen, haben unterhalb des Kristallitschmelzbereiches zwei Dispersionsgebiete, die für die beiden Phasen charakteristisch sind. Weichmacher führen zu einer Entkoppelung der benachbarten Kette. Dies bedingt eine Erhöhung der *Dispersionsfrequenz* bei gleicher Temperatur. Die Vernetzung bedingt eine Versteifung des Molekulargüsters, so dass sich die Verlustmaxima bei gegebener Frequenz zu höheren Temperaturen verschieben. Je nach Einsatzgebiet ist auf einen niedrigen oder hohen Verlustfaktor zu achten.

innere Reibung

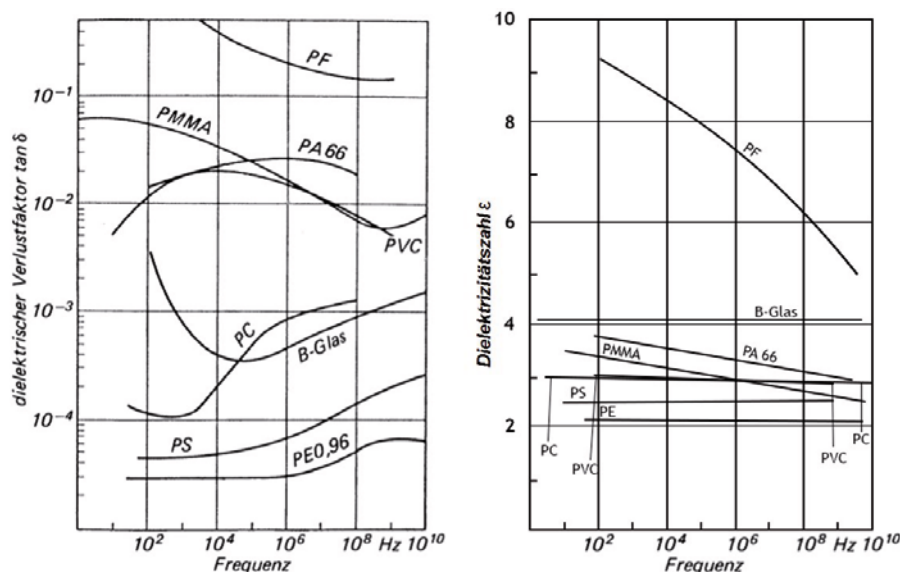


Bild 4.13 Frequenzabhängigkeit des elektrischen Verlustfaktors $\tan \delta$ und der Dielektrizitätszahl ϵ von Kunststoffen bei 20°C (nach Domininghaus)

Bei *Isolatoren* für Hochfrequenzströme und Radarantennenverkleidungen achtet man auf einen möglichst niedrigen Verlustfaktor, um nur geringe Verlustleistungen zu haben. Hier haben sich Polyethylen und Polystyrol besonders bewährt. Dagegen ist das *Hochfrequenzschweißen* nur möglich, wenn eine ausreichende Erwärmung des Kunststoffes gewährleistet ist. Für Isolatoren sollte der Verlustfaktor $\tan \delta < 10^{-3}$, für das Hochfrequenzschweißen $\tan \delta > 10^{-2}$ sein.

Isolatoren

5.2.3.2 Kontinuierliche Aufbereitungsmaschinen

Für die kontinuierliche Aufbereitung können optimierte Einschneckenextruder oder Mehrwellenextruder verwendet werden. Zu den wichtigsten optimierten Einschneckenextrudern zählen der Stiftextruder und der Buss-Ko-Kneter.

5.2.3.2.1 Einschneckenaufbereitungsmaschinen

Stiftextruder

Einfache Einschneckenmaschinen haben eine schlechte Mischwirkung und werden daher nicht in der Aufbereitung eingesetzt. Der Einschneckenstiftextruder und der Buss-Ko-Kneter sind Einschneckenmaschinen, die durch spezielle Maßnahmen auch in der Aufbereitung eingesetzt werden können. Beim Stiftextruder ragen metallische Stifte durch die Zylinderwand bis auf den Schneckengrund. Damit die metallischen Stifte nicht abgeschert werden, sind die Schneckenstege unterbrochen (Bild 5.4). Der Einsatz der Stifte ermöglicht eine größere distributive Mischwirkung mit guter thermischer Homogenität des Mischgutes. Der Einschneckenstiftextruder wird in der Kautschukverarbeitung eingesetzt.

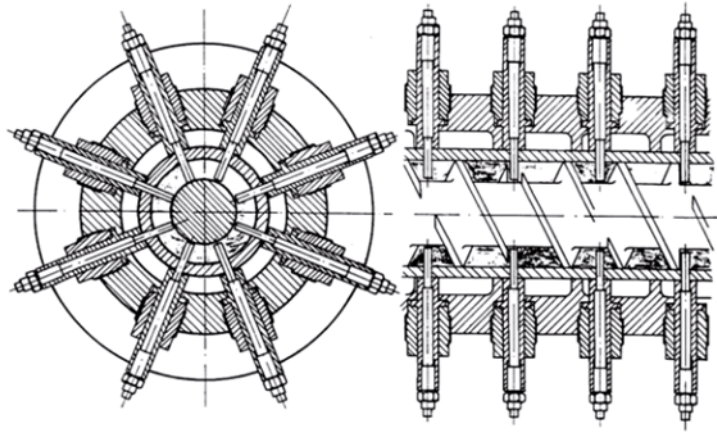


Bild 5.4 Stiftextruder (Querstrom-Misch-(QSM)-Extruder (E. G. Harms))

Buss-Ko-Kneter

Der Buss-Ko-Kneter (Bild 5.5) ist in der Funktionsweise dem Stiftextruder ähnlich. Die sehr gute distributive Mischwirkung wird durch das Zusammenspiel von speziellen Knetelementen und speziellen Knetzähnen oder -bolzen ermöglicht. Die Schnecke des Buss-Ko-Kneters führt pro Umdrehung eine synchrone Hin- und Herbewegung in axialer Richtung aus. Dadurch können ein enges Verweilzeitspektrum sowie geringe produktschädigende Druck- und Temperaturspitzen bei einer hohen distributiven Mischwirkung erreicht werden.

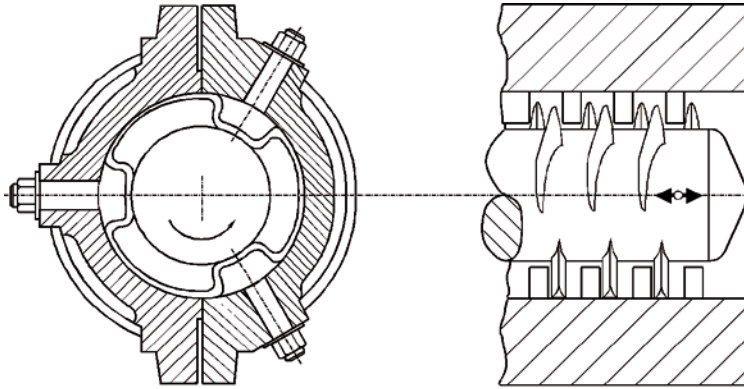


Bild 5.5 Buss-Ko-Kneter

Eine weitere Aufbereitungsmaschine mit einer Schnecke ist der Plastifikator. Der Plastifikator wird primär in der PVC-Aufbereitung verwendet. Über eine Zuführschnecke wird der Rohstoff einem konusförmigen Rotor übergeben, der in einem kegelförmigen Zylindergehäuse angeordnet ist (Bild 5.6). Durch Verschieben des Konus gegenüber dem Gehäuse kann der kegelmantelförmige Spalt verstellt werden. Die gute Homogenisierung des Plastifikats rührt daher, dass das pulverförmige Material im Spalt zuerst zusammengesintert und im weiteren Verlauf plastifiziert wird. Durch den Konus wird der Materialmantel aufgeweitet und durch spiralförmig angeordnete Nuten bzw. Stege immer wieder aufgeteilt und neu geschichtet. Eine gute Temperaturkontrolle ist auch hier über die großen Mantelflächen möglich. Das plastifizierte PVC wird dann über eine Austragsschnecke den Nachfolgeeinheiten zugeführt.

Plastifikator

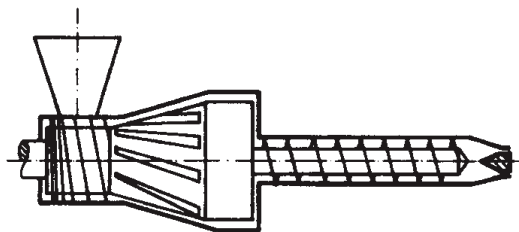


Bild 5.6 Plastifikator

5.2.3.2 Planetwalzenextruder

Der Planetwalzenextruder basiert auf dem Prinzip des Einschneckenextruders. Die Schnecke ist als Spindel ausgeführt, um die mehrere Planetspindeln rotieren (Bild 5.7). Durch diese Anordnung ist es möglich, das Material intensiv zu scheren und zu mischen, da immer wieder neue Oberflächen gebildet werden. Durch die dünnen Materialsichten und die sehr großen Flächen der Zentral- und Planetspindeln ist eine genaue Massetemperaturkontrolle möglich.

■ 6.1 Extrusion

Unter Extrusion oder Extrudieren versteht man die kontinuierliche Herstellung eines Halbzeuges, eines Rohres oder einer Folie aus Kunststoff. Eine Extrusionsanlage besteht aus (Bild 6.1):

- dem Extruder,
- der Anlagensteuerung,
- dem Extrusionswerkzeug, auch Düse genannt,
- der Kalibrierung,
- der Kühlung,
- dem Abzug und
- der Konfektionierung.

Die Funktionsweise und die Bauarten der Anlagenkomponenten werden im Folgenden näher erläutert.

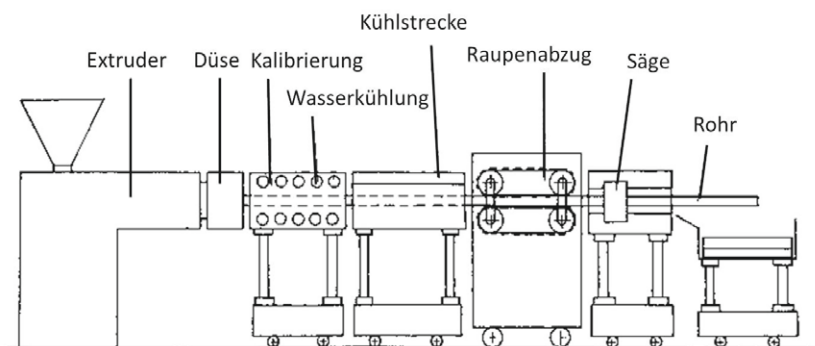


Bild 6.1 Rohrextrusionsanlage (Prinzipbild)

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).

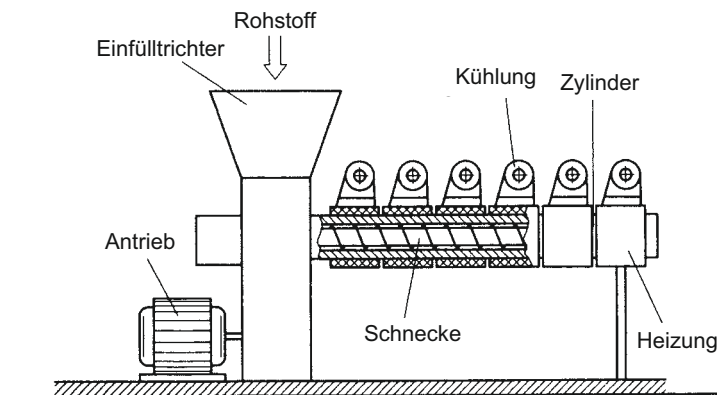


Bild 6.2 Prinzipdarstellung eines Extruder

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.

■ 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.

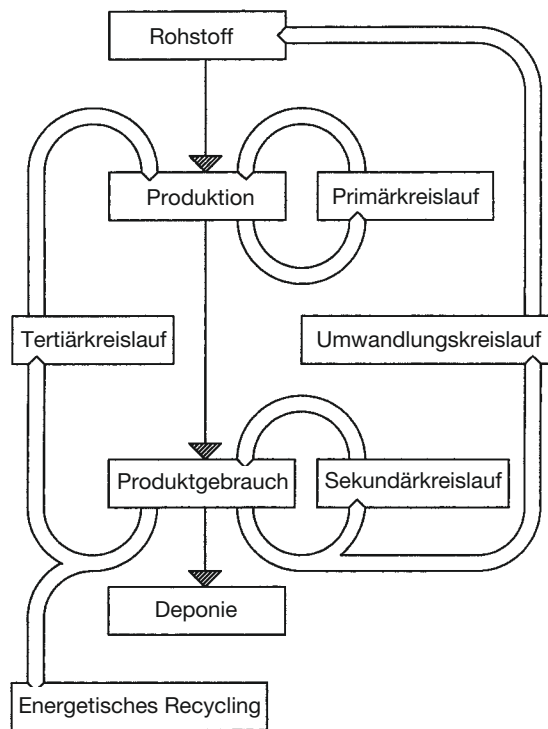


Bild 8.1 Recyclingkreisläufe

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-