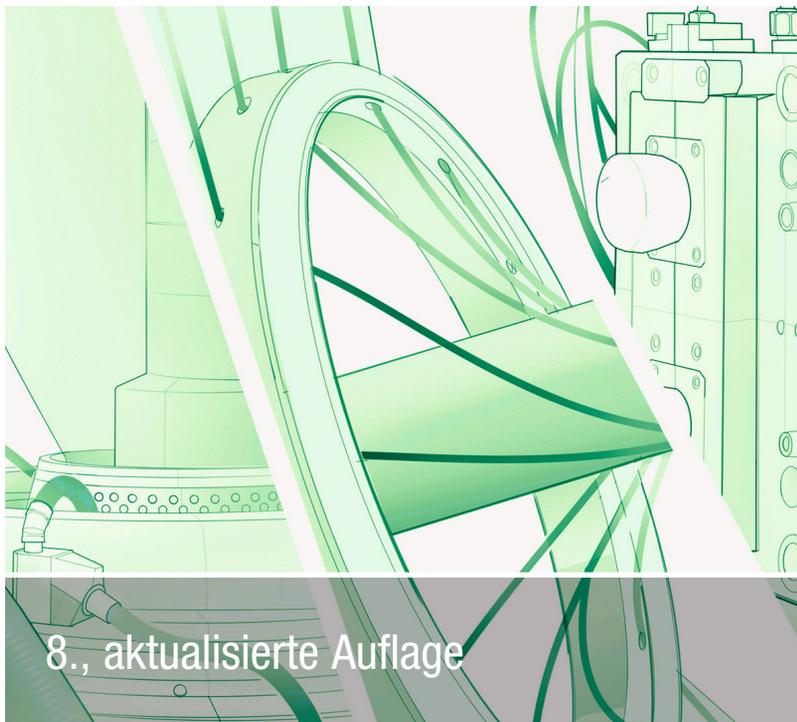


Christian Hopmann  
Walter Michaeli

# Einführung in die Kunststoff- verarbeitung



8., aktualisierte Auflage

HANSER





**bleiben Sie auf dem Laufenden!**

Hanser Newsletter informieren Sie regelmäßig über neue Bücher und Termine aus den verschiedenen Bereichen der Technik. Profitieren Sie auch von Gewinnspielen und exklusiven Leseproben. Gleich anmelden unter [www.hanser-fachbuch.de/newsletter](http://www.hanser-fachbuch.de/newsletter)

## **Die Internet-Plattform für Entscheider!**

**Exklusiv:** Das Online-Archiv der Zeitschrift Kunststoffe!

**Richtungsweisend:** Fach- und Brancheninformationen stets top-aktuell!

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

***Kunststoffe.de***

Christian Hopmann  
Walter Michaeli

# **Einführung in die Kunststoffverarbeitung**

8., aktualisierte Auflage

HANSER

Die Autoren:

*Univ.-Prof. Dr.-Ing. Christian Hopmann*, Institut für Kunststoffverarbeitung (IKV), Aachen

*Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E. h. Walter Michaeli*, ehemals Institut für Kunststoffverarbeitung (IKV), Aachen

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:

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

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

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

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

© 2017 Carl Hanser Verlag München

[www.hanser-fachbuch.de](http://www.hanser-fachbuch.de)

Herstellung: Jörg Strohbach

Coverbild: IKV Aachen

Coverconcept: Marc Müller-Bremer, [www.rebranding.de](http://www.rebranding.de), München

Coverrealisierung: Stephan Rönigk

Satz, Druck und Bindung: Kösel, Krugzell

Printed in Germany

ISBN: 978-3-446-45355-5

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

# 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*



## ■ 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 „Spaltimprägierung“, 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 Strohhäcker, 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*

# 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.



# Kurzzeichen für Polymere

## ■ In Anlehnung an DIN EN ISO 1043-1, DIN 1629

ABS	Acrylnitril-Butadien-Styrol
AMMA	Acrylnitrilmethylmethacrylat
ASA	Acrylnitril-Styrol-Acrylester
AU	Polyesterurethan-Kautschuk
BR	Butadienkautschuk
CA	Zelluloseacetat
CAB	Zelluloseacetobutyrat
CO	Epichlorhydrinkautschuk
CP	Zellulosepropionat
CR	Chloroprenkautschuk
CSM	Chlorsulfoniertes Polyethylen
EAM	Ethylen-Vinylacetat-Kautschuk
ECB	Ethylen-Copolymer-Bitumen
ECO	Epichlorhydrin-Kautschuk
E-CTFE	Ethylen-Chlortrifluorethylen-Copolymer
EP	Epoxid
EPDM	Ethylen-Propylen-Kautschuk
ETER	Epichlorhydrin-Ethylenoxid-Terpolymer
ETFE	Ethylen-Tetrafluorethylen-Copolymer
EVA/EVM	Ethylen-Vinylacetat-Copolymer
FEP	Perfluorethylen-Propylen-Copolymer
FKM	Fluorkautschuk
FPM	Vinylidenfluorid-Hexafluorpropylen-Copolymer
FVMQ	Fluorsilikon-Kautschuk

IIR	Butylkautschuk
IR	Cis-1,4-Polyisoprenkautschuk
MBS	Methylmethacrylat-Butadien-Styrol-Copolymer
MF	Melamin-Formaldehyd
MP	Melamin-Phenol-Formaldehyd
NBR	Acrylnitril-Butadien-Kautschuk
NR	Naturkautschuk
PA	Polyamid
PAN	Polyacrylnitril
PAI	Polyamidimid
PB	Polybutylen, Polybuten
PBI	Polybismaleinimid
PBT	Polybutylenterephthalat
PC	Polycarbonat
PCTFE	Polychlorotrifluorethylen
PE	Polyethylen
PE-HD	Polyethylen hoher Dichte
PE-LD	Polyethylen niedriger Dichte
PE-LLD	Lineares Polyethylen niedriger Dichte
PE-C	Chloriertes Polyethylen
PE-X	Vernetztes Polyethylen
PEEK	Polyetheretherketon
PEI	Polyetherimid
PES	Polyethersulfon
PETP	Polyethylenterephthalat
PMMA	Polymethylmethacrylat
PMP	Polymethylpenten
POM	Polyoxymethylen
PP	Polypropylen
PPB	Polypropylen-Block-Copolymer
PPH	Polypropylen-Homopolymerisat
PPO	Polyvinylnoxid
PPR	Polypropylen-Statistisches-Copolymer
PPS	Polyphenylsulfid
PPSU	Polyphenylsulfon
PS	Polystyrol
PSU	Polysulfon

PTFE	Polytetrafluorethylen
PUR	Polyurethan
PVAC	Polyvinylacetat
PVC	Polyvinylchlorid
PVC-C	Chloriertes Polyvinylchlorid
PVC-P	Polyvinylchlorid weichmacherhaltig
PVC-U	Polyvinylchlorid nicht weichmacherhaltig
PVDC	Polyvinylidenchlorid
PVDF	Polyvinylidenfluorid
PVF	Polyvinylfluorid
PUK	Polyvinylcarbazol
Q	Silikon-Kautschuk
SAN	Styrol-Acrylnitril-Copolymer
SB	Styrol-Butadien-Copolymer
SBR	Styrol-Butadien-Kautschuk
Si	Silikon
TM	Thioplaste
UF	Harnstoff-Formaldehyd
UP	Ungesättigte Polyester
VMQ	Silikon-Kautschuk



# Inhalt

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

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

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

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

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

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

# 1

## Einleitung

Die Beschäftigung des Menschen mit organischen, hochmolekularen Werkstoffen, wie Holz, Textilien oder Leder, ist seit alters her dokumentiert. Dabei beschränkte er sich lange auf die Verarbeitung vorhandener Materialien. Die gezielte Umwandlung von Naturstoffen in die heute unter dem Begriff „Kunststoffe“ bekannten Materialien begann erst im 19. Jahrhundert. Erst seit den 1930er Jahren jedoch kamen die Kunststoffe zu größerer wirtschaftlicher Bedeutung, nachdem Hermann Staudinger Anfang der 1920er Jahre das Modellbild vom Aufbau der Kunststoffe und den daraus resultierenden Synthesemöglichkeiten entwickelt hatte.

Der weltweite Aufschwung der Kunststoffindustrie begann nach dem Zweiten Weltkrieg. Als Ausgangsbasis diente zuerst die Kohle, bis Mitte der fünfziger Jahre die Umstellung auf das billigere Erdöl erfolgte. Der Vorteil dieser Umstellung lag darin, dass bis dato wertlose Raffinationsanteile, die beim Cracken von Rohöl als Spaltprodukte anfielen, sinnvoll verwendet werden konnten. Damit begann parallel zum steigenden Benzin- und Heizölverbrauch ein schnelles Wachstum der Kunststoffproduktion, das erst mit der Erdölkrise 1973 eine gewisse Dämpfung erhielt. Zwar hat sich seither die Wachstumsrate verlangsamt, dennoch verzeichnen diese Werkstoffe weiterhin eine überdurchschnittlich dynamische Entwicklung.

Kunststoff auf Erdölbasis

Die heutige Anwendung der Kunststoffe erstreckt sich auf nahezu alle Lebensbereiche. Sowohl bei Massenartikeln, wie sie in den Bereichen Bauwesen, Verpackung, Landwirtschaft, Haushaltsgeräten und Freizeit Anwendung finden, als auch bei höherwertigen Artikeln, wie in der Elektrotechnik, im Fahrzeug- und Feingerätebau bis hin zu High-Tech-Anwendungen in der Luft- und Raumfahrtindustrie, hat sich der Einsatz von Kunststoff in hohem Maße bewährt.

Bei der Eroberung neuer Einsatzgebiete tritt immer mehr die Substitution von klassischen (metallischen) Werkstoffen durch Kunststoffe in den Vordergrund. Die vielfältigen Möglichkeiten der Einflussnahme auf die Materialeigenschaften lassen den Kunststoff zum „Werkstoff nach Maß“ avancieren. Ein weiterer Vorteil ist, dass Kunststoffe typische „Großserienwerkstoffe“ sind. Die Gründe hierzu liegen in der leichten Verarbeitbarkeit zu auch komplizierter gestalteten Formkörpern in sehr wenigen Arbeitsgängen – beim Spritzgießen z. B. ist es nur ein Arbeitsgang – und dies bei einem vergleichsweise niedrigen Temperaturniveau, was niedrige Energiekosten bedeutet. Trotz einer leichten manuellen Bearbeitbarkeit findet man in der Kunststoffverarbeitung nur in geringem Umfang handwerkliche Einzelfertigung oder eine den Metallen entsprechende spanende Fertigung aus Halbzeugen.

Großserienwerkstoff  
nach Maß

Es ist durchaus nicht unbegründet, dass Kunststoffe eine so rasante Entwicklung durchlaufen haben. Denn Kunststoffe sind Werkstoffe mit einem außergewöhnlichen Leistungsspektrum. Ihre Eigenschaften lassen sich knapp zusammenfassen:

- Kunststoffe sind leicht. Ihre Dichte liegt zwischen 0,8 und 2,2 g/cm<sup>3</sup>. Damit sind sie leichter als Metalle und auch Keramiken.
- Kunststoffe zeigen ein breites, einstellbares Spektrum an mechanischen Eigenschaften. Sie können weich und dehnbar wie auch hart und steif sein.
- Kunststoffe lassen sich einfach und wirtschaftlich bei niedrigen Verarbeitungstemperaturen zu oft nachbearbeitungsfreien, komplexen Teilen verarbeiten. Kunststoffe lassen sich mit relativ geringem Energieeinsatz erzeugen und verarbeiten. Kunststoffe sind jedoch thermisch begrenzt beständig.
- Kunststoffe sind gute thermische und elektrische Isolatoren (wobei in einigen Anwendungsfällen auch genau das Entgegengesetzte gefordert wird und auch in Grenzen erzielbar ist).
- Kunststoffe sind häufig transparent und lassen sich beliebig einfärben.
- Kunststoffe haben eine hohe chemische Beständigkeit.
- Kunststoffe sind durchlässig (Permeation und Diffusion). Dies ist nicht immer gewünscht, jedoch werkstoffspezifisch unterschiedlich. So gibt es Anwendungen, bei welchen gerade dies notwendig ist, z. B. bei Membranen zur Meerwasserentsalzung.
- Kunststoffe lassen sich nach unterschiedlichen Verfahren wiederverwenden bzw. -verwerten.
- Kunststoffe ermöglichen die Integration zahlreicher Funktionen in einem Bauteil und die Fertigung komplexer Produkte in integrierten Prozessen.

„kunststoffgerechtes  
Vorgehen“

Der Einsatz von Kunststoffen ist nur dann erfolgreich, wenn auf die besonderen Merkmale dieser Materialien Rücksicht genommen wird. Gerade bei der Substitution von klassischen Werkstoffen ist die Umstellung von der bisher üblichen Strategie, z. B. bezüglich Werkstoffauswahl und Bauteilkonstruktion, auf eine „kunststoffgerechte“ Vorgehensweise von essentieller Bedeutung. Dies erfordert die eingehende Beschäftigung mit dem Werkstoff, und zwar sowohl mit der Synthese und den Syntheseverfahren als auch mit den Materialkennwerten und dem Werkstoffverhalten sowie auch mit der Vielfalt der Urform- und Weiterverarbeitungsverfahren.

Hierzu eine einfache und übersichtliche Einführung zu geben, ist Zielsetzung dieses Buches.

## ■ Literatur zu Kapitel 1

*Menges, G., Haberstroh, E., Michaeli, W., Schmachtenberg, E.:* Werkstoffkunde Kunststoffe, 6. Aufl., Carl Hanser Verlag, München, 2011

# 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 19. 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.

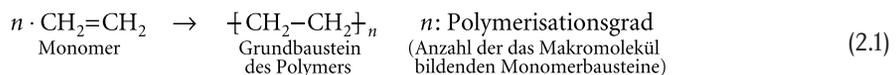
Die niedermolekularen Ausgangsmoleküle bezeichnet man bei allen Reaktionsvorgängen als *Monomere*.

### 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:



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):

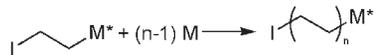
1. Startreaktion, d. h. die Initiatoren ( $I$ ) zerfallen in ihre Radikale ( $I^*$ ) durch Energiezufuhr.
2. Kettenwachstumsreaktion:
  - a) Die Radikale reagieren nun mit einem doppelt gebundenen Kohlenstoffatom eines Monomers ( $M$ ; in diesem Fall Ethen:  $H_2C=CH_2$ ). Es resultieren eine Bindung 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).

- b) Reaktion der radikalischen Gruppe einer Polymerkette mit dem Initiatorradikal (ebenfalls eine Kombination).
- c) Übertragung eines Wasserstoffatoms von einem Makroradikal zu einem anderen Makroradikal (Disproportionierung). Von den zwei entstehenden, unreaktiven Ketten kann diejenige mit der neu gebildeten Doppelbindung theoretisch wieder von einem Radikal angegriffen werden. In diesem Fall wird die bestehende Kette als Verzweigung eingebaut.
- d) Eliminierung eines Wasserstoffatoms (der Radikalposition benachbart) unter Bildung einer Doppelbindung sowie eines neuen, eigenständigen Radikals.

#### Startreaktion



#### Wachstumsreaktionen

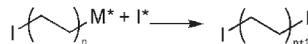


#### Abbruchreaktionen

a) Kombination zweier aktiver Ketten



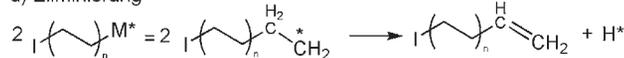
b) Kombination von einer aktiven Kette und einem Initiatorradikal



c) Disproportionierung



d) Eliminierung



**Bild 2.1** Polymerisation

#### 2.1.1.1.2 Ionische Polymerisation

Reaktivität durch Ionen

Im Gegensatz zu der radikalischen Polymerisation, bei der die wachsenden Ketten an einem Ende eine reaktive Stelle (Radikal) besitzen, liegen bei der ionischen Polymerisation am Kettenende immer positiv (Kationen) oder negativ (Anionen) geladene Ionen vor. Dies basiert auf der abweichenden Initiierung, da an dieser Stelle ionische Katalysatoren verwendet werden.