

Christian Bonten

Kunststofftechnik

Einführung und Grundlagen



HANSER

Disclaimer zur Barrierefreiheit

Der Carl Hanser Verlag unternimmt große Anstrengungen, um seine Produkte barrierefrei zu machen. Dazu gehört auch, dass Bilder oder Tabellen für blinde und sehbehinderte Menschen zugänglich gemacht werden. Dies geschieht durch zusätzliche beschreibende Texte (Alternativtexte), die in den Daten integriert sind. Die Alternativtexte können von assistiven Technologien (z. B. Screenreadern) vorgelesen werden. Bei der Erstellung dieser Texte kommt eine KI zum Einsatz. Die inhaltliche Verantwortung liegt weiterhin bei den Lektor:innen und Autor:innen.



Blieben 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

Die Internet-Plattform für Entscheider!

Exklusiv: Das Online-Archiv der Zeitschrift Kunststoffe!

Richtungsweisend: Fach- und Brancheninformationen stets top-aktuell!

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

Kunststoffe.de

Christian Bonten

Kunststofftechnik

Einführung und Grundlagen

4., aktualisierte Auflage

HANSER



Print-ISBN: 978-3-446-48415-3

E-Book-ISBN: 978-3-446-48516-7

Die allgemein verwendeten Personenbezeichnungen gelten gleichermaßen für alle Geschlechter.

Alle in diesem Werk enthaltenen Informationen, Verfahren und Darstellungen wurden zum Zeitpunkt der Veröffentlichung nach bestem Wissen zusammengestellt. Dennoch sind Fehler nicht ganz auszuschließen. Aus diesem Grund sind die im vorliegenden Werk enthaltenen Informationen für Autor:innen, Herausgeber:innen und Verlag mit keiner Verpflichtung oder Garantie irgendeiner Art verbunden. Autor:innen, Herausgeber:innen und Verlag übernehmen infolgedessen keine Verantwortung und werden keine daraus folgende oder sonstige Haftung übernehmen, die auf irgendeine Weise aus der Benutzung dieser Informationen – oder Teilen davon – entsteht. Ebenso wenig übernehmen Autor:innen, Herausgeber:innen und Verlag die Gewähr dafür, dass die beschriebenen Verfahren usw. frei von Schutzrechten Dritter sind. Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt also auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benützt werden dürften.

Die endgültige Entscheidung über die Eignung der Informationen für die vorgesehene Verwendung in einer bestimmten Anwendung liegt in der alleinigen Verantwortung des Nutzers.

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:

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

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.

Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdruckes und der Vervielfältigung des Werkes, 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 UrhG genannten Sonderfälle –, reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

Wir behalten uns auch eine Nutzung des Werks für Zwecke des Text und Data Mining nach § 44b UrhG ausdrücklich vor.

© 2025 Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, München
Vilshofener Straße 10 | 81679 München | info@hanser.de
www.hanser-fachbuch.de

Lektorat: Dr. Mark Smith

Herstellung: le-tex publishing services GmbH, Leipzig

Coverkonzept: Marc Müller-Bremer, www.rebranding.de, München

Covergestaltung: Max Kostopoulos

Titelmotiv: Hier Copyright ergänzen oder, wenn nicht benötigt, Zeile löschen!

Satz: Eberl & Koesel Studio, Kempten

Druck: Elanders Waiblingen GmbH, Waiblingen

Printed in Germany

Vorwort

Vorwort zur 4. Auflage

Sehr habe ich mich gefreut, als im Frühjahr 2025 Herr Dr. Smith vom Carl Hanser Verlag auf mich zukam und fragte, ob ich mir bald eine 4. Auflage vorstellen könnte. Sofort habe ich an das Kapitel 6 „Kunststoffe und Umwelt“ gedacht, welches dringend Ergänzung und Aktualisierung benötigte. Die aktuellen Gesetze zur Reduktion von Abfällen und zur Erhöhung des Recyclinganteils in Kunststoffprodukten erhalten jetzt Platz sowie auch ein Text zu den Beiträgen und Aufgaben der Kunststoffindustrie zur Klimaneutralität 2050. Das Kapitel „Biokunststoffe“ habe ich neu strukturiert und stelle wichtige Biokunststoffe vor.

Beim Lesen der anderen Kapitel der bisherigen, dritten Auflage fand ich zusätzlich viele andere kleine Stellen, die ich nun korrigiert und im Lesefluss verbessert habe. Auch wurden einige QR-Codes mit neuen Filmchen hinterlegt. Bei Fehlerchen in Bildern erhielt ich tolle Unterstützung durch Frau Elisa Seidel. Vielen Dank!

Ihnen allen nun viel Freude mit der aktuellen Ausgabe des Buches!

Stuttgart, im Sommer 2025

C. Bonten

Vorwort zur 3. Auflage

Während der Arbeit an dieser Auflage standen Kunststoffe – ähnlich wie in den 1980er-Jahren – wieder sehr heftig in der Kritik. Gerne lege ich Ihnen daher das Kapitel 6 „Kunststoffe und Umwelt“ besonders ans Herz. Es soll der sachlichen Aufklärung

dienen und stellt manche in diesen Jahren durch die Tagesmedien verbreiteten Zusammenhänge klarer dar.

Kunststoffabfälle in der Umwelt schaden dem Ansehen der gesamten Werkstoffklasse. Aus meiner Sicht ist jedoch nicht der Werkstoff, sondern der Mensch alleine für die Umweltverschmutzung verantwortlich. Unsere derzeitigen Lebensgewohnheiten helfen dabei jedoch wenig: denn wir leben in einer – nein wir sind eine – Wegwerfgesellschaft!

Wenn wir daran festhalten, sind Einwegprodukte aus anderen Werkstoffen interessanterweise meist schlechter für die Umwelt als diejenigen aus Kunststoff. Zahlreiche Ökobilanzen beweisen, dass Produkte aus Kunststoff, seien es die kurzlebigen oder auch die langlebigen, die Umwelt weniger schädigen als diejenigen aus anderen Werkstoffen. Grundsätzlich zeigen Produkte, die lange im Einsatz sind, die bessere Ökobilanz. Es gilt, die Wegwerfgesellschaft zu verteufeln, nicht Kunststoffe! Vielleicht sollten Produkte und Dienstleistungen zukünftig auf Basis von Ökobilanzen besteuert werden? Eventuell mit einem Quotienten „Umweltverbrauch pro Nutzungsdauer“? Der Verbraucher würde sich meist automatisch für das weniger umweltschädlichere, weil kostengünstigere Produkt entscheiden und die Hersteller sind raus aus der Zwickmühle.

Aber bei aller Kritik: auch Einwegprodukte können einen wichtigen Nutzen darstellen, wenn es um Hygiene z. B. bei Lebensmitteln und in der Medizintechnik geht. In Angesicht des Corona-Virus COVID-19 wird bevorzugt wieder zu eingeschweißten Nahrungsmitteln gegriffen und viele infizierte Menschen in der Notfallmedizin sind glücklich, nicht mit wiederverwendeten, ausgekochten Spritzen, durchgespülten Schläuchen und Tropfkammern versorgt zu werden.

Abfälle in der Umwelt – egal welchen Werkstoffs – entstehen aufgrund von mangelnder Disziplin. Umweltschutz fängt bei jedem Einzelnen von uns an! In der dritten Auflage habe ich oben erwähntes Kapitel „Kunststoffe und Umwelt“ ausgebaut und weitere Fehler in Text und Bildern beseitigt.

Stuttgart, im April 2020

C. Bonten

Vorwort zur 1. Auflage

Direkt nach meinem Dienstantritt am Institut für Kunststofftechnik in Stuttgart im Spätsommer 2010, überarbeitete ich gleich mithilfe der mir anvertrauten wissenschaftlichen Mitarbeiter die Vorlesung „Grundlagen der Kunststofftechnik“. Diese wichtige Vorlesung wurde bereits seit langer Zeit unverändert in Stuttgart gehalten. Wir aktualisierten bei der Überarbeitung nicht nur Bilder und Inhalte, sondern gaben der Vorlesung eine neue Struktur, die ich – inspiriert durch didaktische Seminare des

Deutschen Hochschulverbands – für zeitgemäßer halte. Zahlreiche in den Vorlesungen genutzte Filmsequenzen ermöglichten den Studenten, die Inhalte schneller zu verstehen. Ich bin mir sicher, die Studenten für das bevorstehende Berufsleben mit umfassendem grundlegendem Kunststoffwissen auszustatten. Wer das Fach vertiefen möchte, kann dies jeweils in den drei Hauptgebieten „Werkstofftechnik“, „Verarbeitungstechnik“ und „Produktentwicklung“ tun.

Diese einführende und grundlegende Vorlesung bedient als sogenanntes Wahlfach mit vier Unterrichtsstunden pro Woche Masterstudenten der Verfahrenstechnik, des Maschinenbaus (u.ä. wie Produktionstechnik, Kraftfahrzeugtechnik), der Materialwissenschaften und des Technologiemanagements. Die Vorlesung ist eigentlich auf technisch vorgebildete Studenten ausgerichtet, dennoch wählen sie inzwischen auch nichttechnische Studenten. Während nach dem Wintersemester 2010 etwa 100 Studenten dieses Fach prüfen ließen, wurden es nach den Wintersemestern 2011, 2012 und 2013 jeweils etwa 100 Studenten mehr. Die wachsende Menge höchst interessierter und disziplinierter Masterstudenten verleitete mich dazu, die Bilder mit Fließtext zu ergänzen und in Buchform herauszugeben.

Studenten des Winters 2012/13 sprachen mich auf die kritischen Themen an, die man „in den Medien so hört“. Ich beschloss daraufhin, den Themen „Umweltverschmutzung“, „Gifte in Kunststoffen“ und „Biokunststoffe“ bis hin zur Urquelle auf den Grund zu gehen und dies ebenfalls als Vorlesungsteil aufzubereiten. Diese Themen bilden in diesem Buch das Abschlusskapitel und ich habe den Eindruck, dass sachliche Information das beste Mittel zur Aufklärung ist. Der Leser möge entscheiden, ob mir ein sachlicher Umgang mit den Themen gelungen ist.

Ich danke dem Verlag herzlich, dieses Buch in Farbe und mit Hardcover für einen Preis anzubieten, der es für Studenten noch erschwinglich macht. Auch danke ich den unterstützenden Mitarbeitern (s. u.), denn ohne sie wäre das Buch nicht „rund“ geworden. Jeder wissenschaftliche Mitarbeiter hat mindestens ein Unterkapitel aufmerksam durchgearbeitet und wertvolle Hinweise auf Fehler und zur Verständlichkeit des Textes gegeben. Technische Mitarbeiter haben mich mit Bildern aus ihrem Arbeitsalltag unterstützt. Besonders hervorheben möchte ich die Herren Dipl.-Ing. Stefan Epple (Gesamtkoordination), Dipl.-Wirt.-Ing. Oliver Kast („roter Faden“ und Schlagworte), M. Eng. Tristan Koslowski und Manuel Hodrius (Bilder) sowie Dipl.-Phys. Nikolai Gulnizkij (Filme).

Ich bin sicher, jedem Leser/Studenten mit dem Wissen des Buches die Möglichkeit zu geben, schnell in der Kunststoffbranche Fuß zu fassen und ihn früh zur Entscheidung zu befähigen, in welcher Anwendung Kunststoffe Großartiges leisten.

Stuttgart, im Mai 2014

Univ.-Prof.Dr.-Ing. Christian Bonten

Bedanken möchte ich mich weiterhin bei den Mitarbeitern, die an der ersten Auflage beteiligt waren:

- Dipl.-Ing. W. Adebahr
- M. Sc. J.A. Avila
- Dipl.-Ing. O. Celik
- Dipl.-Ing. S. Epple
- Dipl.-Ing. T. Erb
- Dipl.-Phys. P. Fey
- Dipl.-Ing. B. Formisano
- M. Sc. L. Goebel
- M. Sc. S. Göttermann
- Dipl.-Phys. N. Gulnizkij
- Dipl.-Ing. J. Heyn
- Dipl.-Ing. N. Holtmann
- Dipl.-Ing. O. Kast
- G. Keck
- M. Eng. T. Koslowski
- Dr.-Ing. M. Kroh
- S. Liebert
- A. Mason
- Dr. J. Mauri
- U. Müller
- M. Sc. M. Musialek
- Dipl.-Ing. B. Neubig
- S. Osterloh
- Dipl.-Ing. M. Poindl
- Dipl.-Ing. M. Rahammer
- M. Simmet
- M. Sc. O. Skrabala
- Dr. rer. nat. S. Weinmann
- M. Eng. F. Willems

Der Autor: Prof. Christian Bonten



Univ.-Prof. Dr.-Ing. Christian Bonten leitet das Institut für Kunststofftechnik (IKT) in Stuttgart, eines der führenden Forschungsinstitute auf dem Gebiet der Kunststofftechnik. Nach Studium des Maschinenbaus in Duisburg und der Kunststoffverarbeitung an der RWTH in Aachen promovierte Prof. Bonten bei Univ.-Prof. Dr.-Ing. Ernst Schmachtenberg. Nach mehreren Jahren technischer Verantwortung und später Geschäftsverantwortung bei der BASF sowie dem Biokunststoffhersteller FKuR wurde er 2010 von der Universität Stuttgart zum Direktor und Leiter des IKT berufen. Das Institut arbeitet auf allen Gebieten der Kunststofftechnik: der Werkstofftechnik, der Verarbeitungstechnik und der Produktentwicklung.

Hinweise zur Benutzung des Buches

Die Besonderheit dieses Buches ist die Verwendung sogenannter Quick-response-codes (kurz QR-Codes), welche im Jahr 1994 in Japan entwickelt wurden. Sie werden in diesem Buch genutzt, um das Smartphone mit dem Youtube-Kanal des IKT zu verbinden und einen zum Thema passenden Film oder eine passende Animation ablaufen zu lassen. Den Nutzern dieses Buches bietet dies die Verschmelzung des „erstarrten“ gedruckten Buches mit den Möglichkeiten des Internets.

QR-Codes ermöglichen – ganz ähnlich wie die aus dem Lebensmittelhandel bekannten Strichcodes – durch das Abscannen die Übertragung einer Information. Sie sind eine quadratische Matrix aus schwarzen und weißen Punkten, welche die codierten Daten in Binärkodierung darstellen. Heutzutage benötigt man keinen besonderen Scanner mehr, sondern scannt den Code einfach mit seiner Smartphone-Kamera.

Die Information wird meist schnell erkannt und mit dem einen oder anderen Klick läuft der passende Youtube-Film automatisch ab. Wer die Filme nacheinander anschauen möchte, tippt bei Youtube einfach „Institut für Kunststofftechnik“ ein. Manche der Filme haben eine Tonspur, daher: Lautsprecher an!



Hier kann ein Video abgespielt werden.

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

Sollten Lehrkräfte an Schulen o. ä. die in diesem Buch verwendeten Bilder für ihre nicht kommerziellen Unterrichtszwecke verwenden wollen, senden wir diese gerne zu. Wir bitten, darauf zu achten, dass die „Quelle: C. Bonten, Kunststofftechnik, 2025, Carl Hanser Verlag“ stets genannt wird.

Inhalt

Vorwort	V
Vorwort zur 4. Auflage	V
Vorwort zur 3. Auflage	V
Vorwort zur 1. Auflage	VI
Der Autor: Prof. Christian Bonten	IX
Hinweise zur Benutzung des Buches	XI
1 Einleitung	1
1.1 Kunststoff – Werkstoff der Moderne	1
1.2 Einsatzgebiete von Kunststoffen	6
1.3 Kunststoffe und Design	9
2 Grundlagen	13
2.1 Von Monomer zu Polymer – Grundlagen der Polymerchemie	13
2.1.1 Herkunft der Monomere	13
2.1.2 Polymersynthese	16
2.1.2.1 Polymerisation	16
2.1.2.2 Copolymerisation (Sonderform der Polymerisation)	19
2.1.2.3 Polykondensation	20
2.1.2.4 Polyaddition	21
2.1.3 Die Molmasse von Polymeren	22
2.1.4 Bindungskräfte und Brown'sche Molekularbewegung	28
2.1.4.1 Inermolekulare chemische Bindungen	28

2.1.4.2	Intermolekulare physikalische Bindungen	30
2.1.4.3	Brown'sche Molekularbewegung – Beweglichkeit der Polymerketten	33
2.1.5	Mechanismen der Erstarrung und Unterteilung der Polymere ...	34
2.1.6	Primärstruktur von Polymeren: Konstitution und Konfiguration	38
2.1.7	Sekundär- und Tertiärstrukturen von Polymeren: Konformation	39
2.1.7.1	Amorphe Strukturen	41
2.1.7.2	Kristalline Strukturen	42
2.1.7.3	Einfluss der Primärstruktur	42
2.1.7.4	Überstrukturen	45
2.1.8	Polymere – Rohstoff nicht nur für Kunststoffe	49
2.2	Grundlagen der Kraftübertragung	50
2.2.1	Wichtige Begriffe	50
2.2.1.1	Festigkeit	50
2.2.1.2	Steifigkeit	50
2.2.1.3	Zähigkeit	50
2.2.1.4	Spannungs-Dehnungs-Diagramme	51
2.2.2	Zustandsbereiche von Kunststoffen	54
2.2.2.1	Glasübergangstemperatur T_g	55
2.2.2.2	Kristallitschmelztemperatur T_m	56
2.2.2.3	Zustandsbereiche vernetzter Polymere	57
2.2.3	Mechanische Ersatzmodelle	58
2.3	Kunststoff und Kunststofftechnik – Begriffsbestimmung	62
3	Kunststoff-Werkstofftechnik	67
3.1	Verhalten in der Schmelze – Fließeigenschaften und deren Messung	68
3.1.1	Strömungsmechanische Grundlagen	69
3.1.2	Einflüsse auf das Fließverhalten	77
3.1.3	Das Konzept der repräsentativen Viskosität	81
3.1.4	Dehnung von Schmelze	84
3.1.5	Strangaufweitung und Schrumpf	86
3.1.6	Rheometrie – die Messung der Fließeigenschaften	88
3.1.6.1	Die Messung des Schmelzemassefließrate MFR	89
3.1.6.2	Das Hochdruck-Kapillarrheometer	91

	3.1.6.3 Rotationsrheometer	92
	3.1.6.4 Dehnrheometer	97
3.2	Verhalten als Festkörper – Festkörpereigenschaften und deren Messung	98
	3.2.1 Mechanische Eigenschaften von Kunststoffen	99
	3.2.1.1 Der Zugversuch	100
	3.2.1.2 Der Schnellzerreiversuch	103
	3.2.1.3 Zeit- und Temperatureinfluss auf das mechanische Verhalten	104
	3.2.1.4 Der Zeitstandversuch	107
	3.2.1.5 Der Schwingversuch	109
	3.2.1.6 Der Biegeversuch	112
	3.2.1.7 Zur Unterscheidung von Proben und Prüfkörpern	114
	3.2.2 Physikalische Eigenschaften	115
	3.2.2.1 Elektrische Eigenschaften	115
	3.2.2.2 Magnetische Eigenschaften	118
	3.2.2.3 Optische Eigenschaften	119
	3.2.2.4 Akustische Eigenschaften	126
	3.2.3 Werte für den Wärme- und Stoffaustausch	128
	3.2.3.1 Spezifische Enthalpie h	129
	3.2.3.2 Spezifische Wärmekapazität c_p	130
	3.2.3.3 Dichte ρ	133
	3.2.3.4 Wärmeleitfähigkeit λ	134
	3.2.3.5 Wärmeausdehnungskoeffizient α	137
	3.2.3.6 Temperaturleitfähigkeit a	138
	3.2.3.7 Wrmeindringzahl b	140
	3.2.3.8 Stofftransport	140
3.3	Beeinflussung der Eigenschaften durch Zusatzstoffe	144
	3.3.1 Verstärkungsstoffe – Aktive Zusatzstoffe	145
	3.3.1.1 Die Fasern und das Prinzip der Verstärkung	148
	3.3.1.2 Die Aufgaben der Matrix	151
	3.3.1.3 Kraftübertragung des Faserkunststoffverbunds	152
	3.3.1.4 Defekte in Faserkunststoffverbunden	156
	3.3.1.5 Nanopartikel als aktive Zusatzstoffe	160
	3.3.2 Funktions-Zusatzstoffe – Additive	162
	3.3.2.1 Viskosittsverndernde Zusatzstoffe – Fließhilfsmittel ..	162

3.3.2.2	Weichmacher	163
3.3.2.3	Zumischung anderer Polymere – Bildung von Polymerblends	165
3.3.2.4	Schlagzähmodifizierer	165
3.3.2.5	Keimbildner (Nukleierungsmittel)	167
3.3.2.6	Haftvermittler	168
3.3.2.7	Leitfähige Zusatzstoffe	169
3.3.3	Füllstoffe – Inaktive Zusatzstoffe	170
3.4	Von Polymer zu Kunststoff – Einführung in die Kunststoff- Aufbereitung	171
3.4.1	Der Doppelschneckenextruder	172
3.4.2	Verfahrenstechnik	173
3.4.3	Charakteristische Kennwerte	177
3.4.4	Zusatzaggregate	178
3.5	Prozess, Struktur, Eigenschaften – Beeinflussung im Verarbeitungsprozess	181
3.5.1	Eigenspannungen	182
3.5.2	Orientierung von Makromolekülen	183
3.5.3	Orientierung von Fasern	185
3.5.4	Kristallisation	187
3.5.5	Bildung einer Makrostruktur: Schäumen von Kunststoffen	187
3.6	Veränderungen mit der Zeit – Einblick in die Alterung von Kunststoffen	189
3.6.1	Alterungsursachen	190
3.6.2	Alterungsvorgänge	191
3.6.2.1	Mechanische Alterungsmechanismen	191
3.6.2.2	Physikalische Alterungsmechanismen	192
3.6.2.3	Chemische Alterungsmechanismen	194
3.6.2.4	Wirkweise von Alterungsstabilisatoren	196
3.6.3	Alterungserscheinungen	197
3.6.4	Charakterisierung des Alterungsfortschritts	198
3.7	Kurzdarstellung einiger wichtiger Kunststoffe	200
3.7.1	Polyethylen (PE)	204
3.7.2	Polypropylen (PP)	205
3.7.3	Ethylen-Propylen-(Dien)-Copolymere (EPDM)	207
3.7.4	Polyvinylchlorid (PVC)	209

3.7.5	Polystyrol (PS)	212
3.7.6	Styrol-Butadien-Styrol-Copolymere (SBS)	213
3.7.7	Styrol-Acrylnitril-Copolymere (SAN)	214
3.7.8	Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymere (ABS)	217
3.7.9	Acrylnitril-Styrol-Acrylester-Copolymere (ASA)	219
3.7.10	Polyamid (PA)	221
3.7.11	Polybutylenterephthalat (PBT)	226
3.7.12	Polyethylenterephthalat (PET)	227
3.7.13	Polycarbonat (PC)	230
3.7.14	Polymethylmethacrylat (PMMA)	233
3.7.15	Polyoxymethylen (POM)	235
3.7.16	Polytetrafluorethylen (PTFE)	238
3.7.17	Polyetheretherketon (PEEK)	239
3.7.18	Polyethersulfon (PES) und Polysulfon (PSU)	242
3.7.19	Polyphenylensulfid (PPS)	243
3.7.20	Cellulosederivate	245
3.7.21	Polyhydroxyalkanoate (PHA)	248
3.7.22	Polylactid (PLA)	250
3.7.23	Thermoplastisches Polyurethan (TPE-U, auch TPU)	251
3.7.24	Polyurethan (PUR)	252
3.7.25	Epoxidharze (EP)	254
3.7.26	Melaminformaldehydharz (MF)	255
3.7.27	Phenol-Formaldehyd- oder Phenolharz (PF)	256
3.7.28	Harnstoff-Formaldehydharz (UF)	257
3.7.29	Ungesättigtes Polyesterharz (UP)	258
4	Kunststoff-Verarbeitungstechnik	263
4.1	Extrusion	264
4.1.1	Extruderschnecke und Zylinder	265
4.1.2	Der Hochleistungsextruder Helibar®	273
4.1.3	Rohr- und Profilextrusion	275
4.1.4	Flachfolien- und Plattenextrusion	281
4.1.5	Schlauch- und Blasfolienextrusion	282
4.1.6	Extrusionsblasformen	284
4.1.7	Co-Extrusion	285

4.2	Spritzgießen	287
4.2.1	Der Spritzgießprozess	290
4.2.2	Das Plastifizieraggregat	293
4.2.3	Die Schließeinheit mit Spritzgießwerkzeug	296
	4.2.3.1 Rheologische Auslegung	298
	4.2.3.2 Thermische Auslegung	300
4.2.4	Einfluss des Spritzgießprozesses auf die Eigenschaften des Bauteils	303
4.2.5	Vorstellung einiger Sonderverfahren	306
	4.2.5.1 Spritzprägen	307
	4.2.5.2 Thermoplastschaum-Spritzgießen	308
	4.2.5.3 Kaskaden-Spritzgießen	309
	4.2.5.4 Mehr-Komponenten-Verfahren	309
	4.2.5.5 Sandwich-Spritzgießen	311
	4.2.5.6 Fluidinjektionstechniken	313
	4.2.5.7 Hinterspritztechnik	315
	4.2.5.8 Spritzstreck-Blasformen	316
	4.2.5.9 Variotherme Werkzeugtemperierung	318
4.3	Verarbeitung von vernetzenden Kunststoffen	319
4.3.1	Pressen	321
4.3.2	Transferpressen	323
4.3.3	Spritzgießen	323
4.3.4	Verarbeitung von Polyurethan	324
4.4	Technologie der Faserkunststoffverbunde	329
4.4.1	Handlaminieren und Faserspritzen	330
4.4.2	Pressen von SMC und GMT	331
4.4.3	Pultrusion von Endlosfasern	335
4.4.4	Arbeiten mit Prepregs	336
4.4.5	Harzinjektionsverfahren	337
4.4.6	Dreidimensionale Faserkunststoffverbundstrukturen	339
4.5	Weiterverarbeitung	341
4.5.1	Thermoformen	342
4.5.2	Mechanische Bearbeitung von Kunststoffen	350
4.5.3	Schweißen	353
	4.5.3.1 Heizelementschweißen	355

4.5.3.2	Ultraschallschweißen	359
4.5.3.3	Vibrationsreißschweißen	361
4.5.3.4	Laserschweißen	362
4.5.4	Kleben	363
4.5.5	Fügen durch Schnappverbindungen, Schrauben und Nieten	369
4.5.6	Beschichten von Kunststoffen	372
4.5.6.1	Beschichtete Bauteile	372
4.5.6.2	Beschichtungsverfahren	375
5	Produktentwicklung mit Kunststoffen	383
5.1	Kunststoffe als Konstruktionswerkstoffe	384
5.1.1	Kunststoffspezifische Alleinstellungsmerkmale	384
5.1.2	Werkstoffvorauswahl	387
5.2	Geometrische Unterteilung von Produkten	390
5.2.1	Großflächige Produkte	390
5.2.2	Gehäuseartige Produkte	391
5.2.3	Behälterartige Produkte	392
5.2.4	Komplexe Produkte	392
5.2.5	Funktionsspezifische Produkte	393
5.2.6	Bedeutung für die Wahl des Verarbeitungsverfahrens	393
5.3	Konstruieren mit Kunststoffen	396
5.3.1	Anforderungen an Produkte und Funktionen	396
5.3.2	Nutzen der Gestaltungsfreiheit – Integration von Funktionselementen	399
5.3.3	Nutzung der Gestaltungsfreiheit – Erhöhung des Flächenträgheitsmoments	404
5.3.4	Werkstoffgerechtes Konstruieren	408
5.3.5	Fertigungsgerechtes Konstruieren	418
5.3.6	Beanspruchungsgerechtes Konstruieren	421
5.3.6.1	Dimensionierung gegen eine zulässige Spannung	424
5.3.6.2	Dimensionierung gegen eine kritische Dehnung	426
5.3.6.3	Dimensionierung gegen den Zeiteinfluss – Lebensdauervorhersage	429
5.3.7	Kurzzusammenfassung der kunststoffgerechten Konstruktion ...	432
5.4	Nutzen von Prototypen in der Produktentwicklung	434
5.4.1	Rapid Prototyping	435

5.4.1.1	Stereolithographie (SLA)	436
5.4.1.2	Selektives Lasersintern (SLS)	437
5.4.1.3	Laminated Object Manufacturing (LOM)	438
5.4.1.4	3D-Printing (3D-P)	438
5.4.1.5	Strangablegeverfahren (FFF)	439
5.4.2	Rapid Tooling	441
5.4.2.1	Gießverfahren	442
5.4.2.2	Lasersintern von Werkzeugen	445
5.4.3	Wahl eines Prototypverfahrens	446
5.4.3.1	Anforderungen an den Prototyp	446
5.4.3.2	Prototypen für großflächige Produkte und für gehäuseartige Produkte	447
5.4.3.3	Prototypen für behälterartige Produkte	448
5.4.3.4	Prototypen für komplexe Produkte	450
6	Kunststoffe und Umwelt	453
6.1	Kunststoffabfälle	453
6.1.1	Vermeidung von Abfällen	457
6.1.2	Recycling von Abfällen	458
6.1.3	Was können wir tun?	461
6.2	Sind Kunststoffe giftig?	462
6.3	Biopolymere und Biokunststoffe	467
6.3.1	Biobasierte Kunststoffe	468
6.3.2	Biologisch abbaubare Kunststoffe	473
6.3.3	Vom Biopolymer zum Biokunststoff – Compoundierung ist der Schlüssel	476
6.4	Ressourcenschonung mit Kunststoffen	478
6.4.1	Herkunft des Begriffes der „Nachhaltigkeit“	478
6.4.2	Der Brundtland-Bericht und das Kyoto-Protokoll	479
6.4.3	Ressourcenschonung mit Kunststoffen	481
6.4.4	Regenerative Energieerzeugung mit Kunststoffen	486
6.4.5	Wie wird die Kunststoffindustrie CO ₂ -neutral bis 2050?	489
6.5	Fazit	490

A	Anhang: Empfehlungen zur Abfassung einer Bachelor-/Masterarbeit am IKT	495
A.1	Unterschiedlicher Anspruch an eine Bachelor-, Master- und Doktorarbeit	495
A.2	Wissenschaftliche Methoden	496
A.2.1	Quellen-untersuchende Methoden	496
A.2.2	Theoretische Methoden	497
A.2.3	Empirische Methoden	497
A.3	Wissenschaftliche Arbeit	498
A.4	Bachelor- oder Masterarbeit	499
A.4.1	Zum Titel der Abschlussarbeit	500
A.4.2	Zum Inhalt der Arbeit	500
A.4.2.1	Zusammenfassung	500
A.4.2.2	Einleitung	501
A.4.2.3	Hauptteil	501
A.4.2.4	Schlussbemerkungen	502
A.4.2.5	Anhang	502
A.4.3	Zum Umfang der Arbeit	502
A.4.4	Zum Schreibstil der Arbeit	503
	Index	505

1

Einleitung

„An was denken Sie, wenn Sie das Wort ‚Kunststoff‘ hören?“ ist oft die erste Frage an meine Stuttgarter Studierende. Interessanterweise denken sie meist zunächst an Einsatzgebiete (Leichtbau, Automobil, Flugzeuge, aber auch Verpackungen und Wärmedämmung), dann an die Unterteilung in Thermoplaste, Elastomere und Duromere, die sie vielleicht aus der Schule in Erinnerung haben. Manchmal fallen ihnen noch Begriffe zur Verarbeitung wie Spritzgießen oder Extrusion ein und außerdem kommt das Thema „Vermüllung der Meere“ auf.

Kunststoffe scheinen bereits ein so fester Bestandteil des Alltags zu sein, dass Ingenieurstudierende der höheren Semester damit etwas Nützliches verbinden. In dieser Einleitung soll zunächst ein Blick in die junge Geschichte der Kunststoffe und die aktuellen Einsatzgebiete geworfen werden, bevor die besondere Bedeutung der Kunststoffe für designgeprägte Produkte hervorgehoben wird.

1.1 Kunststoff – Werkstoff der Moderne

Die Erde ist vermutlich 4,54 Milliarden Jahre alt, Pflanzen („Flora“) entstanden erst vor 540 Mio. Jahren, Pilze, Flechten und erste Tiere („Fauna“) etwa vor 440 Mio. Jahren. Der Homo sapiens sapiens, also der intelligente, moderne Mensch, existiert seit etwa 40 000 Jahren und in diesem – weltgeschichtlich gesehen – kurzen Zeitraum hat er Erstaunliches geschaffen.

Während seine Vetter und Basen, die Menschenaffen, in der Steinzeit verharrten, also gefundene Steine bearbeiten und als Werkzeug benutzen, erfand der moderne Mensch immerhin (womöglich durch Zufall) den Werkstoff Glas, welcher bereits 4000 Jahre v. Chr. in Ägypten bekannt war.

Auf die Kupfersteinzeit, die letzte Phase der Steinzeit, folgte die Bronzezeit (Bild 1.1). Mit Bronze bezeichnet man Legierungen, die mindestens zu 60% aus Kupfer bestehen und Zinn beinhalten. Bronze gilt damit als erste, gezielt von Menschen erstellte und genutzte Legierung, eine Leistung, die bereits metallurgische Kenntnisse voraussetzte. Abgelöst wurde die Bronzezeit schließlich allmählich von der frühen Eisenzeit (Hallstattzeit). Eisen und seine Legierungen erfordern noch mehr metallurgische Kenntnisse und noch höhere Temperaturen, welche schließlich noch überlegenere Waffen und Werkzeuge wie z. B. die der Römer ermöglichten.

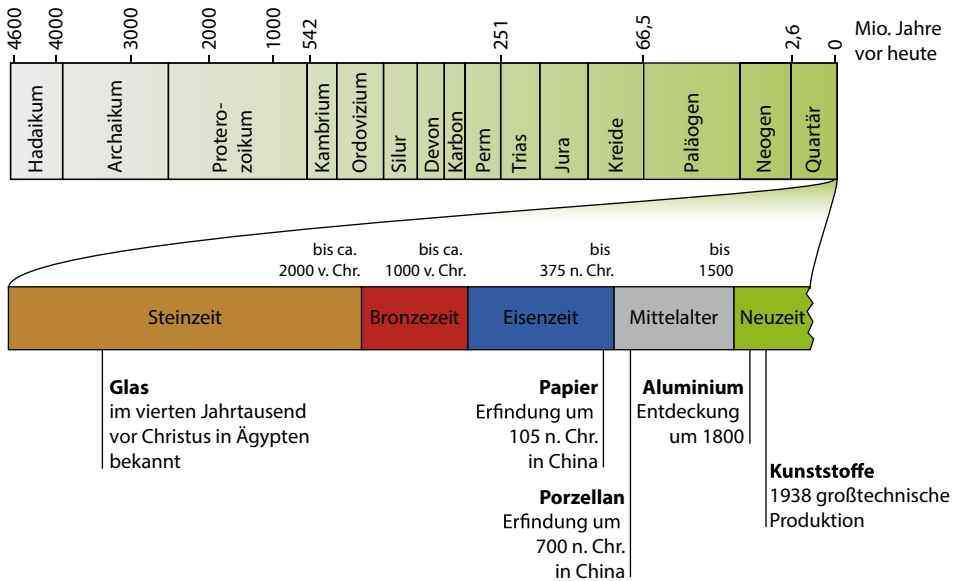


Bild 1.1 Zeitliche Abfolge verschiedener entwickelter Werkstoffe in der menschlichen Entwicklung

Über 1000 Jahre lang gab es dann in Europa und dem Nahen Osten (der damaligen „bekannten“ Welt) eigentlich keinen neuen Werkstoff. Erst Anfang des 18. Jahrhunderts wurde durch J. F. Böttger und E. W. von Tschirnhaus das europäische Porzellan möglich (welches in China bereits rund 1000 Jahre existierte). Anfang des 19. Jahrhunderts wurde Aluminium erfunden und Mitte des 19. Jahrhunderts dann die frühen Kunststoffe (ab Mitte des 20. Jahrhunderts allerdings erst großtechnisch umgesetzt).

Wegen des starken und zunehmenden Einsatzes von Kunststoffen gibt es Historiker, die bereits jetzt von der „Kunststoffzeit“ sprechen. Erstmals überstieg 1983 der weltweite Verbrauch von Kunststoff mit $125\,000\,000\text{ m}^3$ den von Eisen [1]. In der Geschichte der Kunststoffe werden nach Waentig vier Epochen unterschieden [2]:

- Ursprünge (bis 1839),
- Epoche der Imitationsstoffe (1839 bis 1914),
- Epoche der Ersatzstoffe (ab ca. 1914 bis ca. 1950),
- Epoche der Werkstoffe mit neuen Eigenschaften (ab ca. 1950).

Epoche der Imitationsstoffe

Im Sommer 1847 erhält der junge deutsche Heeresingenieur Werner Siemens vom preußischen Heer den Auftrag, eine unterirdische Telegrafeneitung zu verlegen, die auf seinen Vorschlag hin mit dem Saft des malaysischen Guttaperchabaums isoliert wurde. Bis Oktober 1847 gründet er in Berlin ein Telegrafene-Unternehmen, aus dem die Siemens AG entstand. Werner Siemens entwickelte zugleich eine Presse, mit der man Kupferdraht nahtlos mit Guttapercha ummanteln konnte. Die Maschinen- und Prozessentwicklung ging mit der Werkstoffmodifizierung und Produktentwicklung Hand in Hand.

Am Anfang der Geschichte der Kunststoffe stand auch ein ökologisches Problem, das uns auch heute nicht fremd ist. Aufgrund der starken Nachfrage nach Elfenbein für Kugeln des in den USA beliebt gewordenen Billardspiels standen die Elefanten in Ceylon, dem heutigen Sri Lanka, schon in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts kurz vor dem Aussterben.

Einem amerikanischen Tüftler, J. W. Hyatt, gelang 1867 die Synthese eines Ersatzstoffes, des Celluloid. Aber Celluloid war nicht nur reizvoll für Billardkugeln, sondern auch für die preisgünstige Nachahmung von Luxusprodukten aus Elfenbein, Schildpatt, Perlmutter oder Horn für alle möglichen Gegenstände des Alltags (Bild 1.2). Eine noch epochalere Bedeutung kommt der Erfindung von G. Eastman, dem Chef des Kodak-Konzerns, zu, der 1884 den fotografischen Film patentieren ließ: dünne Streifen aus Celluloid als Träger für eine lichtempfindliche Schicht [1].



Bild 1.2 Celluloid, Ersatz für teure Naturwerkstoffe [Bildquelle: Deutsches Kunststoffmuseum]

Ähnlich war es bei der Entwicklung des Bakelit[®], des ersten vollsynthetischen Kunststoffes auf Phenolharzbasis, durch den Belgier Leo Hendrik Baekeland zu Beginn des 20. Jahrhunderts. Der wärmeformbeständige, elektrisch isolierende und leichte Werkstoff war für die noch junge Elektrotechnik ideal für den Einsatz als Gehäusewerkstoff von Radios und Telefonen (Bild 1.3) und für noch komplexere Geometrien von Schaltern und Lampenfassungen (Bild 1.4). Elektrische Geräte verbreiteten sich zu dieser Zeit rasend schnell.

Epoche der Ersatzstoffe

Noch vor dem 1. Weltkrieg unternahm Fritz Klatte die ersten Schritte zur industriellen Produktion eines der wichtigsten Massenkunststoffe des 20. Jahrhunderts: Polyvinylchlorid (PVC), welches vom Franzosen Henri Victor Regnault erfunden wurde, aber bis dahin nicht in großen Mengen produziert werden konnte.



Bild 1.3

Fernsprecher-Gehäuse aus Bakelit [Bildquelle: Deutsches Kunststoffmuseum]



Bild 1.4

Klingelknopf zum Rufen von Hausangestellten [Bildquelle: Deutsches Kunststoffmuseum]

Die mechanischen Eigenschaften und die Beständigkeit dieses Werkstoffs gegenüber Chemikalien und Umwelteinflüssen sowie seine preisgünstige Herstellung machten ihn universell einsetzbar: Von säureresistenten Arbeitsschutzhandschuhen bis hin zu Taschen und Koffern aus Kunstleder. Die Schallplatte aus dem sogenannten Vinyl ersetzte jene aus Schellack, einem Sekret von speziellen Läusen, und drehte sich bis weit in die 1980er-Jahre auf jedem Plattenteller [1].

Epoche der Werkstoffe mit neuen Eigenschaften

Auch vor dem 1. Weltkrieg waren diese Pioniere oft nur auf Empirie, also auf Idee und Experiment, angewiesen, um neue Erfindungen auf dem Gebiet der Kunststoffe zu machen. Dies änderte sich, als der Freiburger Professor Hermann Staudinger 1922 durch seine Theorie der Makromoleküle die Vorgänge bei der Bildung von Polymeren und Kunststoffen erklärbar machte (Nobelpreis 1953).

Es ist daher nicht verwunderlich, dass in den 1930er-Jahren zahlreiche neue Stoffe entwickelt wurden: Polymethylmethacrylat (PMMA; „Plexiglas®“) von Röhm, Polystyrol® (PS) von BASF (heute Ineos Styrolution), Polyethylen (PE) von Imperial Chemical Industries (heute Akzo Nobel) und die Polyamide (PA), Nylon® von DuPont, und Perlon®, erfunden vom Stuttgarter Chemiker Paul Schlack [1].

Nach einer Stagnation während des 2. Weltkriegs war der Siegeszug der Kunststoffe nicht mehr aufzuhalten. Schon gegen Ende der 1930er-Jahre hatte Otto Bayer das Polyurethan entwickelt. In den 1950er-Jahren gab es zahlreiche Anwendungsmöglichkeiten von Weich- und Hartschäumen aus Polyurethan (PUR), meist Polstermöbel und Sportartikel.

Im Jahr 1949 erschuf Fritz Stastny von der BASF durch sein Verfahren, Polystyrol aufzuschäumen, mit expandiertem Polystyrol (EPS; Styropor®) einen sehr leichten Werkstoff. Es wurde sofort für die stoßabsorbierende Verpackung von empfindlichen Gütern und zur Wärmedämmung eingesetzt. Karl Ziegler ließ 1953 ein gefahrloses und preisgünstiges Verfahren zur Herstellung von Polyethylen (PE) patentieren, das diesen Kunststoff erst richtig marktfähig machte (Nobelpreis 1963 gemeinsam mit Giulio Natta). Bis heute gehört es mit dem Polypropylen (PP) zu den am meisten verbreiteten Werkstoffen [1].

Hermann Schnell bei Bayer in Krefeld-Uerdingen gelang 1953 die Synthese des Polycarbonats (PC). Es verbindet Transparenz mit sehr guten mechanischen Eigenschaften. Der Werkstoff wird geschätzt als Alternative für Glas in der Bauindustrie und als Gehäuse für Elektrogeräte, meist auch gemischt mit ABS. Splitterfeste Scheinwerfer-Streuscheiben aus Polycarbonat sorgen heute für mehr Sicherheit und weniger Masse im Auto. Ab ca. 1982 wurde es in großen Mengen für die Herstellung optischer Datenträger eingesetzt. Die Compact Disc (CD) verdrängte die bewährte Schallplatte aus PVC fast vollständig, es folgten DVD und Blu-Ray-Disc [1]. Diese wurden dann durch Solid State Discs (SSD) verdrängt, die wenig Kunststoff beinhalten.

1.2 Einsatzgebiete von Kunststoffen

Für den Personentransport werden Kunststoffe immer häufiger eingesetzt, weil sie mit ihren geringen Massenkräften auch die Massenträgheit reduzieren (sogenannter Leichtbau, obwohl Trägheit nicht gleich Gewicht ist). Wird die Massenträgheit reduziert, wird weniger Energie für Bewegungsvorgänge gebraucht.

Bild 1.5 zeigt ausgewählte Beispiele von Fahr- und Flugzeugen, deren Kunststoffanteil immer größer wird. Zum Beispiel ist unten rechts die Baureihe A 350 von Airbus gezeigt, die aus über 50 M.-% kohlenstoffaserverstärkten Kunststoffen besteht.



Bild 1.5 Anwendung von Kunststoffen im Personentransport [Bildquellen: Deutsche Bahn AG/Pablo Castagnola, BMW Group, Honda Motor Ltd., Airbus AG]

Das größte Einsatzgebiet für Kunststoffe sind die leichten Lebensmittelverpackungen, in Bild 1.6 dargestellt am Beispiel von Folien und Kunststoffflaschen. Für viele Menschen ist nicht auf den ersten Blick erkennbar, welche Leistungen von Verpackungen erbracht werden. Bei genauerem Hinschauen wird deutlich, dass Verpackungen aus Kunststoff mit minimalen Einsatzmengen einen schützenden „Schirm“ über das Lebensmittel entfalten, dessen stoffliche oder energetische Effizienz durch andere Verpackungsmaterialien nicht erreicht werden kann. Wir kommen in Abschnitt 6.3 noch näher darauf zu sprechen.



Bild 1.6 Verpackungen aus Kunststoff

Am Beispiel des europäischen Kunststoffverbrauchs wird in Bild 1.7 gezeigt, dass Verpackungen ein sehr wichtiges Einsatzgebiet von Kunststoffen sind, gefolgt vom Einsatz im Bauwesen, z. B. als Dämmmaterial, für Rohrleitungen oder als wärmedämmende Fensterrahmen. Danach erst folgen Fahrzeuge und Elektrotechnikanwendungen.

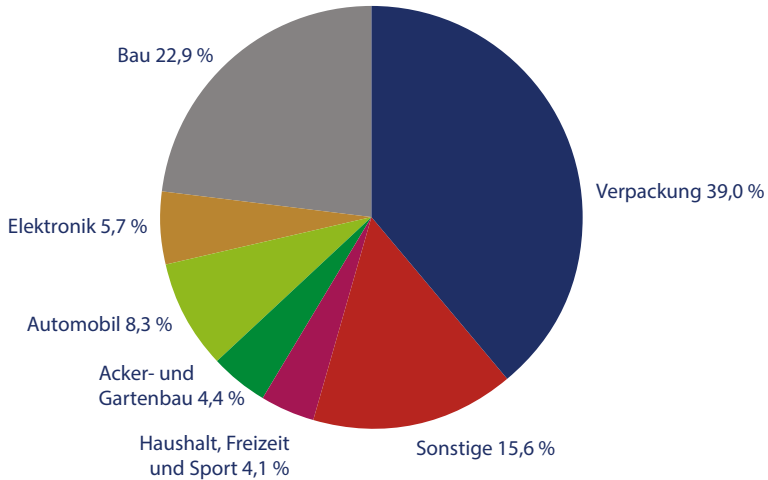


Bild 1.7 Kunststoffeinsatz in Europa 2022 [3]

Besonders auffällig ist, dass Verpackungen eher kurzlebige Anwendungen von Kunststoffen sind, hingegen manche Anwendungen im Baubereich am besten 50 Jahre oder länger halten sollen. Hier bemerkt man bereits das Dilemma, unter welchem diese Werkstoffklasse leidet.

Unter „Sonstige“ versteht man z. B. die Einsatzgebiete: Sport und Freizeit (Bild 1.8), Möbel, Spielzeuge und Medizintechnik. Es wird deutlich, dass es eigentlich keine Branche gibt, in der Kunststoffe nicht eingesetzt werden!



Bild 1.8 Anwendungen im Sportbereich

1.3 Kunststoffe und Design

Viele konsumnahe Produkte nutzen Design als Alleinstellungsmerkmal (z. B. Apple®, Loewe®, aber auch z. B. Gardena® und Rimowa®). In einigen Fällen kann über die Technik und Qualität allein keine deutliche Differenzierung mehr gegenüber dem Wettbewerb geschehen. Kunststoffe sind das „Chamäleon der Werkstoffe“ und daher ein von Designern gern genutzter Werkstoff. Mit den frühen Kunststoffen war es möglich, kostbare Naturstoffe wie Horn, Schildpatt, Perlmutter und Elfenbein zu imitieren (Bild 1.2), und auch mit modernen Kunststoffen ist es möglich, viele andere hochwertige Werkstoffe optisch und teils auch haptisch zu imitieren und hieraus kostengünstig Produkte herzustellen.

Was Kunststoffbauteile außerdem so attraktiv macht, ist nicht nur die geringere Masse, sondern auch die meist geringeren Bauteilkosten. Die kostengünstige und ressourcenschonende Urformung, die wir in Kapitel 4 „Verarbeitungstechnik“ noch kennenlernen werden, erlaubt eine hohe Formgebungsvielfalt und dadurch Gestaltungsfreiheit (siehe auch Kapitel 5 „Produktentwicklung“). Beides ist besonders attraktiv sowohl für Ingenieurinnen als auch Industriedesigner.

Der Aspekt „kostengünstig“ hat sicherlich dazu geführt, dass auf Kunststoffen lange Zeit ein Billig-Image gegenüber anderen Werkstoffen haftete und sich das – eigentlich falsche – Wort „Plastik“ einbürgerte. Heute werden Kunststoffprodukte zunehmend zu hochwertigen Designprodukten verarbeitet, ohne ihre werkstoffliche Identität zu verlieren. Kunststoffe sind immer weniger Ersatzstoffe für andere Werkstoffe als ein bislang „nicht existenter Innovationsstoff“ [4].

Die Formgebung eines Fahrzeuginnenraums, die aufeinander abgestimmte Farbgebung, die Haptik und Akustik sind ein Erlebnis, welches kaum den Begriff „billig“ assoziieren lässt (Bild 1.9): Hier ist so ziemlich alles aus Kunststoff.



Bild 1.9 Hochwertiger Fahrzeuginnenraum aus verschiedenen Kunststoffen
[Bildquelle: BMW Group]

Designer mögen besonders, dass Kunststoffe sich einfärben lassen (Bild 1.10), was mit kaum einem anderen Werkstoff möglich ist. Brotdosen, Kugelschreiber, Duschgefäßen und viele andere Kunststoffprodukte gibt es in vielfältigen Farben und Farbkombinationen.

Mit der Einfärbung kann zum einen der teurere Lackierschritt eingespart werden, zum anderen behält das Bauteil seine Farbe, auch wenn die Oberfläche beschädigt wird. Dies ist ein Vorteil, den z.B. Motorradhersteller nutzen und von lackierten Blechteilen – wo es technisch geht – zu UV-stabil eingefärbten Kunststoffbauteilen hinüberwechseln. Es ergeben sich nicht nur die o.g. ästhetischen Vorteile nach Kratzern, sondern auch eine weit geringere Bauteilmasse bei geringeren Herstellkosten.



Bild 1.10 Alltagsbauteile mit verschiedenen Farben, Formen und Oberflächen

Die Formgebungsvielfalt inspirierte schon immer Designer und Künstler. In Bild 1.11 ist „La Chaise“ vom Ingenieur- und Künstlerpaar Charles und Ray Eames aus dem Jahre 1948 abgebildet, welches jahrzehntlang nur als Modell existierte und in Museen ausgestellt wurde. Anfang der 1990er-Jahre traute sich der deutsch-schweizerische Möbelhersteller Vitra AG in dessen Serienfertigung mit modernen Werkstoffen zu investieren und bereut es heute sicherlich nicht.

**Bild 1.11**

Ästhetische Form des „La Chaise“
[Bildquelle: Vitra AG]

Das Bild 1.12 zeigt von links nach rechts den weltberühmten Freischwinger-Stuhl des Dänen Verner Panton in verschiedenen Varianten. Zunächst hat er ihn als Prototyp aus glasfaserverstärktem Kunststoff (GFK) manuell auf einer einseitigen Holzform gefertigt und seinen Freunden gezeigt. Deren Zuspruch ermutigte ihn zu einer Serienfertigung und er fand in der Vitra AG ein wagemutiges Unternehmen, welches den Stuhl mit Unterstützung der damaligen Bayer AG aus Polyurethan verwirklichte (Abschnitt 4.3.4). Er musste nachträglich noch geschliffen, gespachtelt und lackiert werden. Der Stuhl fand dermaßen Anklang, dass in noch größeren Stückzahlen gedacht wurde und sich das Spritzgießverfahren (siehe Abschnitt 4.2) lohnte.

Es musste zwar viel Geld für die Spritzgießform investiert werden, jedoch war keine Nacharbeit mehr erforderlich, auch die Farbe war bereits im Werkstoff enthalten. Nun unterstützte die BASF mit ihrem UV-beständigen Acrylester-Styrol-Acrylnitril (ASA) die Realisierung. Ende der 90er-Jahre – im Rahmen einer Retro-Welle – wurden die Stühle erneut in großer Menge produziert, jetzt aber spritzgegossen aus langglasfaserverstärktem Polypropylen (PP-LGF) mit matter Oberfläche.

**Bild 1.12** Verschiedene Stadien des Panton-Stuhls [Bildquelle: Vitra AG]

Literaturverzeichnis

- [1] N. N., „<http://www.deutsches-kunststoff-museum.de>“, 2014. [Online]. Available: <https://www.deutsches-kunststoff-museum.de/kunststoff/geschichte/>. [Zugriff am 08. April 2014].
- [2] F. Waentig, „Konservieren und Restaurieren von gealterten Kunststoffen,“ Restaurator im Handwerk, Nr. 2, 2013.
- [3] PlasticsEurope, „Plastics – the Facts 2022“, Brüssel, 2023.
- [4] G. Klein, „Design für Innovationsstoffe“, Kunststoffe, Nr. 9, 2000.

2

Grundlagen

Für den mit Kunststoffen arbeitenden Ingenieur ist eine Einführung in die Polymerchemie eine notwendige Grundlage, denn die Eigenschaften als Werkstoff, während der Verarbeitung und im fertigen Bauteil hängen stark von Aufbau und Molekülgestalt der Polymere ab.

In diesem Kapitel werden auch einige für das Verständnis dieser Werkstoffklasse notwendige Grundlagen der Werkstoffmechanik aufgefrischt, um die Besonderheiten dieser Werkstoffklasse z. B. bei Zeit- und Temperatureinfluss besser verstehen und vorhersagen zu können.

2.1 Von Monomer zu Polymer – Grundlagen der Polymerchemie

Wir werden die Herkunft der Monomere und die drei wichtigsten Polyreaktionen kennenlernen, uns die Molmasse und Molmassenverteilung von Polymeren verdeutlichen und die wirkenden Bindungskräfte besser verstehen. Hiernach soll noch auf die sogenannte Primär-, Sekundär- und Tertiärstruktur von Polymeren eingegangen werden, da nicht nur die Atome der Polymerkette, sondern vor allem deren Anordnung die späteren Werkstoffeigenschaften stark beeinflussen.

2.1.1 Herkunft der Monomere

Seit Ende des 2. Weltkriegs, also zu Beginn der modernen Epoche der Kunststoffe, wird Erdöl als Ausgangsstoff für die Polymerchemie verwendet. In einer Raffinerie wird Rohöl destilliert (nach Molekülgröße sortiert), gecrackt (kleingespalten), refor-

miert (Moleküle teilweise umgebaut) und raffiniert (aufgereinigt). Es entstehen Stoffe wie Gase, Benzine, Heizöl, Bitumen, Schmieröl und Koks (Kettenlänge ansteigend) sowie – je nach Fundort des Öls mehr oder weniger – Schwefel.

Aus dem Rohbenzin namens Naphtha können u. a. Ethen und Propen – zwei leichtflüchtige Gase – gewonnen werden. Diese Gase hießen früher Ethylen und Propylen, Namen, die sich in der Kunststofftechnik und Polymerchemie bis heute gehalten haben, und waren zunächst Abfallstoffe, welche ohne Energiegewinnung verbrannt wurden. Seit langer Zeit jedoch nutzt man Naphtha zur Herstellung von Chemierohstoffen wie z. B. Polymeren.

Synthetische Polymere werden aus kleineren Molekülen, den sogenannten Monomeren („mono“; griech.: eins, eine, einer, allein, „mer“; griech.: Teil, Anteil), fadenförmig gebildet. Werden nur wenige (z. B. 10) kleinere Moleküle aneinandergereiht, so bilden sich sogenannte Oligomere von wachsartiger, teils klebriger Konsistenz. Werden mindestens 1000 Atome über chemische Bindungen miteinander verknüpft, spricht man von Polymeren („poly“; griech.: viel). Diese sehr langen Moleküle nennt man auch Makromoleküle („makros“; griech.: groß, weit, lang).

In Bild 2.1 ist eine ältere, aber interessante Darstellung der BASF zu sehen. Sie zeigt, dass nicht nur Ethylen und Propylen, sondern auch andere Chemikalien aus Rohöl gewonnen werden, welche u. a. Rohstoffe für andere Polymere sind. Mit wenigen Rohstoffen (Erdöl, Erdgas, Steinsalz, Schwefel, Wasser, Luft) kann ein Chemieunternehmen ca. 30 bedeutende Monomere herstellen, aus denen Polymere verschiedenster Art und unterschiedlichsten Eigenschaftsspektrums hergestellt werden. Die BASF hat inzwischen das Geschäft mit einigen der dargestellten Polymere in Tochterfirmen ausgegliedert oder verkauft: das heißt aber nicht, dass sie nicht noch die Rohstoffe für diese Polymere liefert.

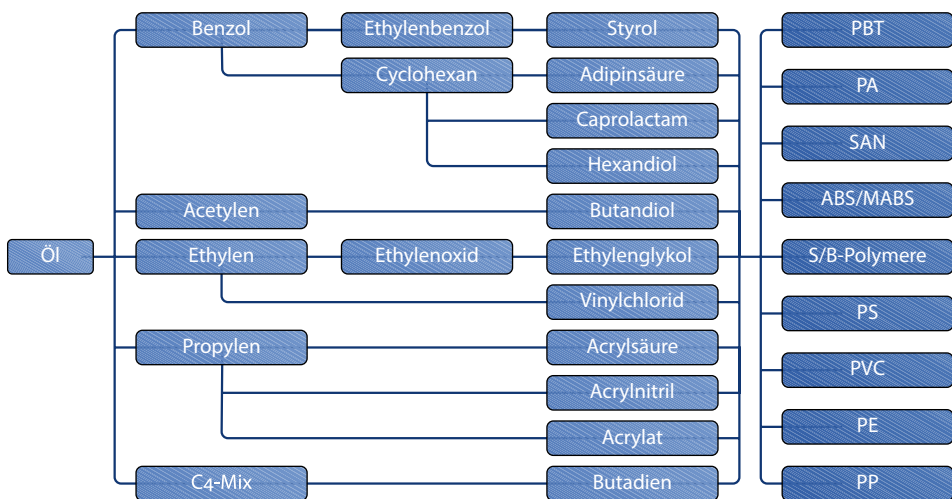


Bild 2.1 Polymerherstellungsrouten [Bildquelle: BASF SE]

Da die Ölvorräte langfristig knapper und nicht zuletzt durch die CO₂-Besteuerung teurer werden, ist es sinnvoll, zunehmend Polymere aus nachwachsenden Rohstoffen herzustellen (Bild 2.2). Die Biosynthese läuft entweder in der Natur selbst ab (Beispiele für natürliche Polymere sind Proteine, Zellulose, Spinnenseide) oder sie wird in Bioreaktoren bewusst herbeigeführt:

- Biopolymere aus Pflanzen (z. B. Gummibaum)
- Biopolymere aus Tieren (z. B. Chitin, Kasein)
- Biopolymere aus Mikroorganismen (z. B. Biosynthese von PHA als Energiespeicher spezieller Bakterien)
- Biomonomere aus Mikroorganismen (z. B. Fermentation von Stärke zu Milchsäure und spätere synthetische Polymerisation zu Polymilchsäure PLA)
- Biomonomere aus Pflanzen (z. B. Polymerisation von aus Bioalkohol gewonnenem Bio-Ethen zu Bio-Polyethylen)

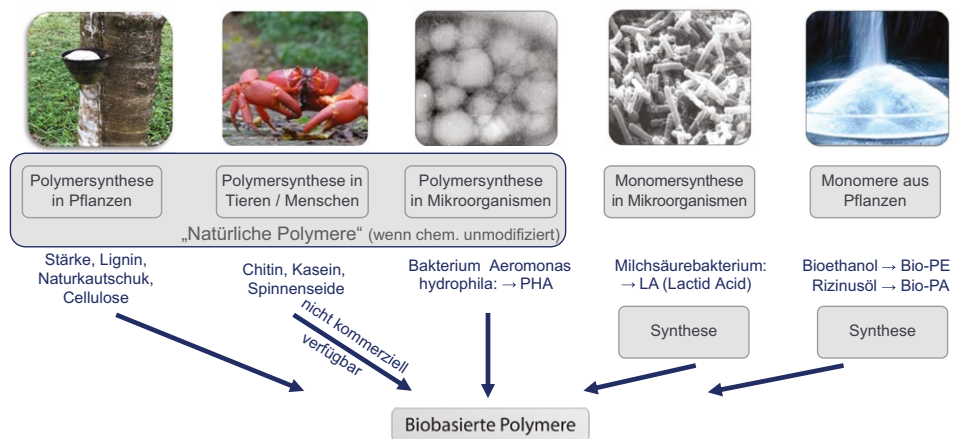


Bild 2.2 Synthese von biobasierten Polymeren [Bildquelle: IGVP, Univ. Stuttgart]

Am Beispiel von fünf möglichen Routen in Bild 2.3 wird deutlich, welche biobasierten Chemikalien und Polymere allein aus Glukose, einem Einfachzucker, hergestellt werden können. Glukose wird hauptsächlich von Pflanzen mithilfe von Fotosynthese aus Sonnenlicht, Wasser und CO₂ produziert und kann von allen Lebewesen als Energie- und Kohlenstofflieferant verwertet werden.

Normalerweise kommt Glukose aber nicht frei, sondern als Disaccharid (Milchzucker, Rübenzucker) oder in ihrer langkettigen, polymeren Form (wie Stärke, Cellulose u. a.) vor, die in Pflanzen sowohl Reservestoffe als auch Bestandteil der Zellstruktur sind. Die langkettigen Saccharide werden bei der Nahrungsaufnahme durch Menschen, Tiere, Pilze und Bakterien mithilfe von Enzymen erst wieder zum Einfachzucker Glukose abgebaut, bevor sie verstoffwechselt werden.

Wir werden in Abschnitt 6.3 noch näher auf biobasierte Polymere und biobasierte Kunststoffe eingehen.

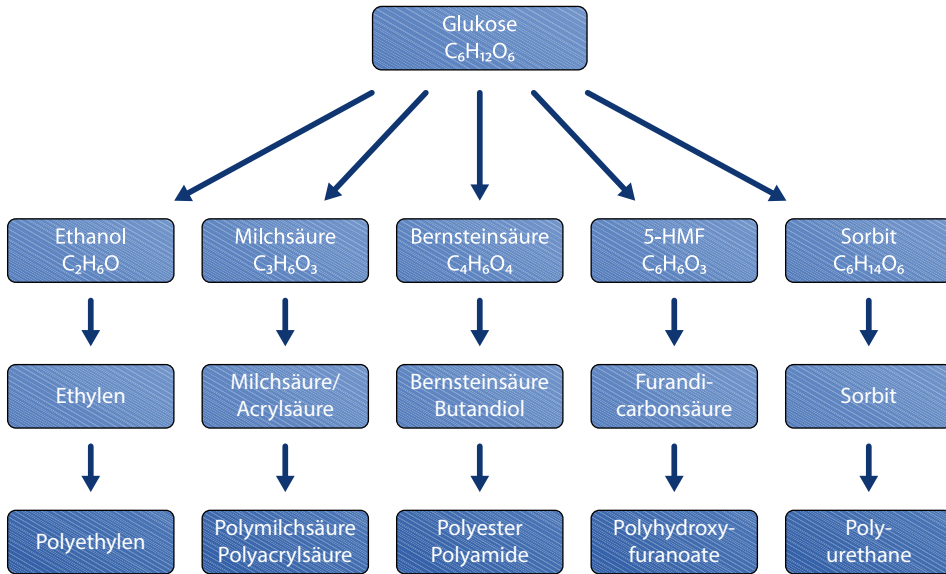


Bild 2.3 Glukosebasierte Polymere [Bildquelle: IGVP, Univ. Stuttgart]

2.1.2 Polymersynthese

Die drei wichtigsten chemischen Reaktionen (Polyreaktionen), welche Monomere zu Polymeren reagieren lassen, sind die Polymerisation, die Polykondensation und die Polyaddition. Während die Polymerisation eine Kettenwachstumsreaktion ist, bei der ungesättigte Monomere zu Polymeren verknüpft werden, sind die Polykondensation und Polyaddition Stufenwachstumsreaktionen, bei denen unterschiedliche Moleküle im Wechsel miteinander reagieren und eine lange Molekülkette bilden. Beide Stufenwachstumsreaktionen sind ähnlich, aber während bei der Polyaddition keine Nebenprodukte abgespalten werden, entstehen bei der Polykondensation Nebenprodukte wie Wasser, Chlorwasserstoff, Ammoniak und Alkohole, die abgeführt werden müssen, um die Reaktion fortzuführen.

2.1.2.1 Polymerisation

Die Polymerisation soll hier am Beispiel einer radikalischen Polymerisation erläutert werden (Bild 2.4). Bei der radikalischen Polymerisation liefert ein Radikalbildner, der sog. Initiator, Radikale, d.h. Moleküle mit freiem/ungepaartem Elektron, welche die C=C-Doppelbindung in den Monomeren, wie z.B. dem Ethen, angreifen. Der Initiator

„schnappt“ sich ein Elektron dieser Doppelbindung und geht eine Bindung mit dem Monomer ein. Dieser Schritt wird als Kettenstart bezeichnet.

Das Monomer wird durch die Bindung an den Initiator nun selbst zum Radikal und geht deshalb mit einem benachbarten Monomer eine Bindung ein. Dieses wird dadurch wiederum zum Radikal und sucht sich einen nächsten Partner. Die Molekülkette wird immer länger, was als Kettenwachstumsreaktion bezeichnet wird. Das Wachstum der Ketten wird durch Rekombination beendet, d. h. die Radikale zweier Molekülketten gehen eine chemische Bindung ein.

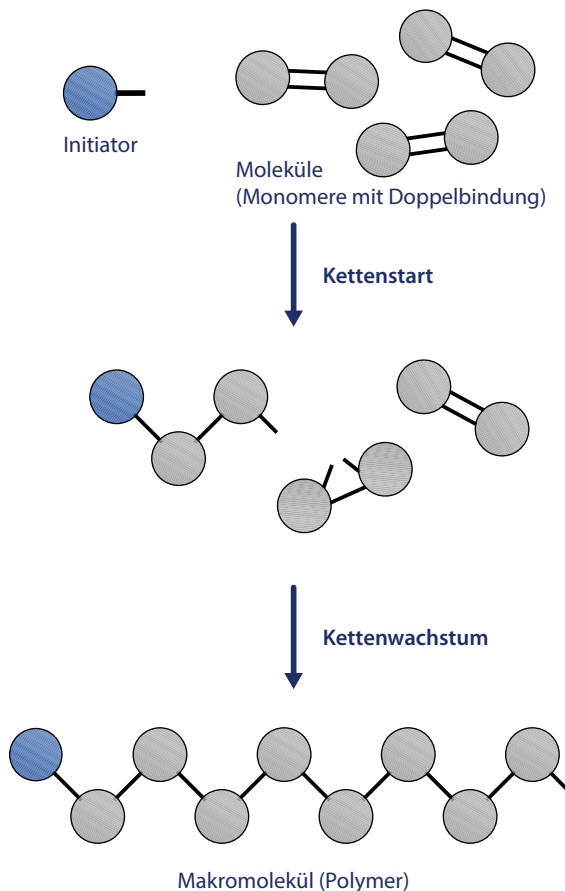


Bild 2.4

Schematischer Ablauf der radikalischen Polymerisation



QR-Code 2-1

Am Beispiel der radikalischen Polymerisation wird die Herstellung von Polyethylen ausgehend von Ethen gezeigt.

http://www.ikt.uni-stuttgart.de/links/Videolinks/Radikalische_Polymerisation

Die Länge der Molekülketten wird hier durch die Konzentration des Initiators bestimmt. Je höher die Initiatorkonzentration, desto mehr Ketten werden zu Beginn der Polymerisation gestartet und desto weniger Monomere stehen pro Kette zur Verfügung. Die Molekülketten bleiben also kürzer bei Hinzugabe von mehr Initiator.

Aus n Monomeren wird ein Polymer mit n Wiederholungseinheiten gebildet (Bild 2.5). Das Monomer ist in der Regel eine Kohlenwasserstoffverbindung. Die einfachste Verbindung ist das Ethen (früher: Ethylen).

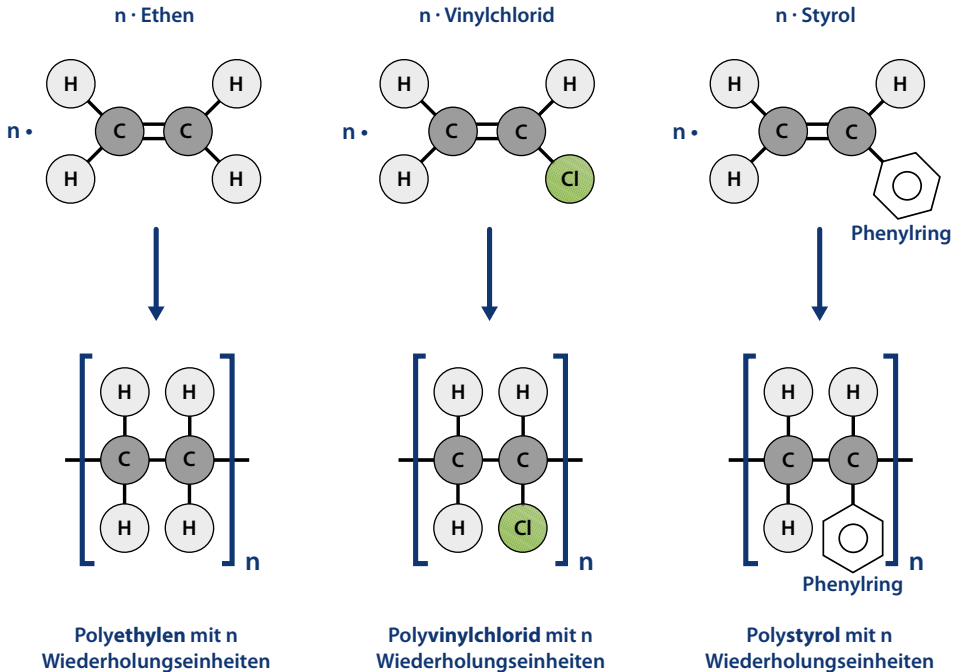


Bild 2.5 Strukturformeln verschiedener Monomere und daraus gebildeter Polymere

Häufig wird ein Wasserstoffatom durch ein charakteristisches Atom oder eine charakteristische Atomgruppe, dem sogenannten Substituenten, ausgetauscht, wodurch sich die chemische Bezeichnung des Monomers ändert. Bei dem Austausch (Substitution) eines H-Atoms an Ethen durch ein Cl-Atom entsteht das Monomer Chlorethen (Trivialname: Vinylchlorid). Die Substitution durch einen Phenylring ergibt das Phenylen (Trivialname: Styrol). Hieraus wird jeweils durch die radikalische Polymerisation Polyethylen (PE), Polyvinylchlorid (PVC) und Polystyrol (PS) hergestellt.

Für einige Polymerisationsreaktionen existieren spezielle Katalysatoren, sog. metallorganische Verbindungen, welche ein Polymer mit besonders regelmäßiger Struktur erzeugen. Das Monomer kann nur in einer ganz bestimmten Weise an die Kette angekoppelt werden. Man nennt die Art der Bindung zwischen Katalysator und Kette eine

koordinative Bindung und spricht deshalb von einer koordinativen Polymerisation. Wichtige metallorganische Verbindungen sind Ziegler-Natta-Katalysatoren und Metallocen-Katalysatoren.

Die Wissenschaftler Karl Ziegler und Giulio Natta erhielten für ihre Arbeiten 1963 den Nobelpreis.

2.1.2.2 Copolymerisation (Sonderform der Polymerisation)

Werden Polymerisate in ihrer Kettenreaktion nicht aus einer Sorte Monomer, sondern aus verschiedenen Monomeren aufgebaut, wird dies als Copolymerisation bezeichnet. Die Makromoleküle sind dann Copolymere. Der Einbau zweier (seltener: dreier) verschiedener Monomere beeinflusst die Eigenschaften des Polymers sehr. Die Aneinanderreihung der Monomerbausteine in der Kette kann statistisch, alternierend oder blockweise (sogenannte Blockcopolymere) erfolgen (Bild 2.6). Eine spezielle Form der Copolymere sind die Pfropfcopolymere. Dies sind Polymere mit einer homogenen Hauptkette, auf die kürzere Seitenketten einer anderen Monomersorte aufgepfropft sind.

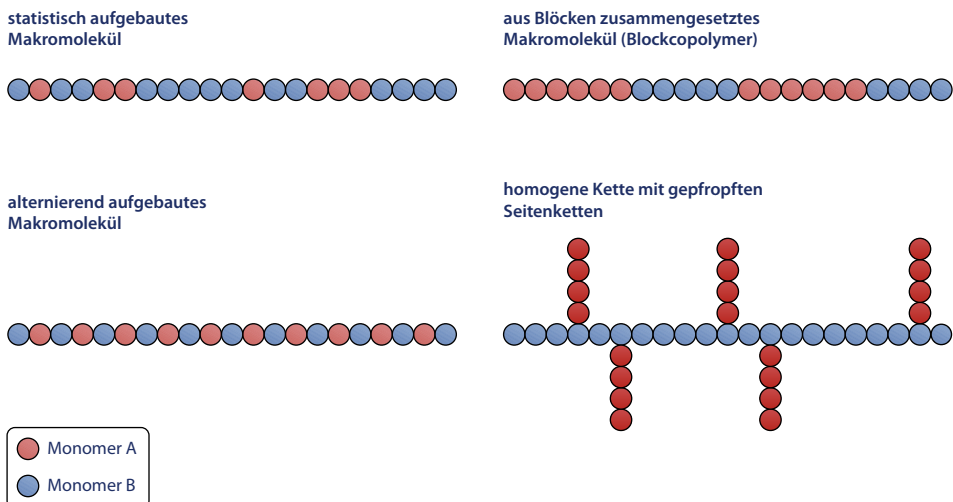
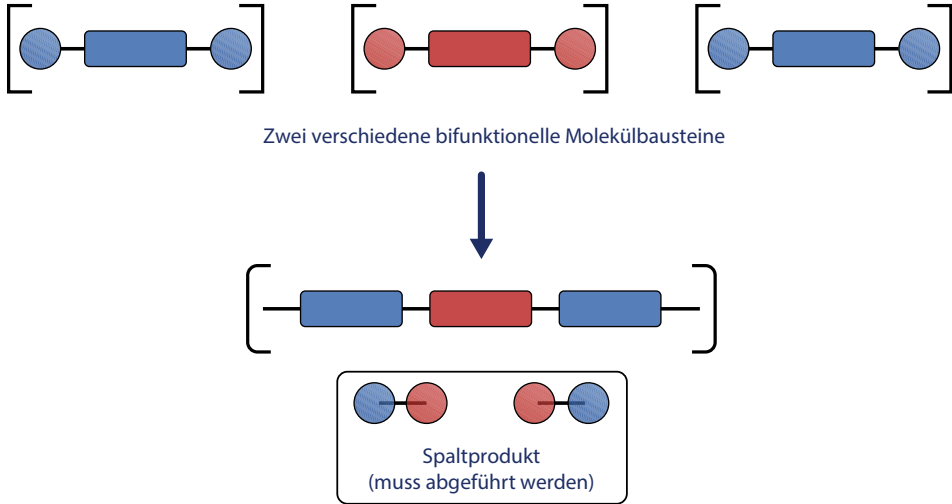


Bild 2.6 Formen der Copolymerisation

Es soll nicht der Eindruck entstehen, dass es sich um eine Stufenwachstumsreaktion zweier verschiedener Monomere handelt. Bei der Copolymerisation handelt es sich ebenso um eine Kettenwachstumsreaktion, lediglich mit zwei unterschiedlichen Monomeren. Zudem soll hier darauf hingewiesen werden, dass die physikalische (nicht chemische!) Mischung verschiedener Polymere nicht das gleiche ist wie ein Copolymer. Bei Polymermischungen spricht man auch von Polymerblends, gelegentlich auch von Polymergemischen oder Polymerlegierungen. Diese werden in Abschnitt 3.3.2.3 behandelt.

2.1.2.3 Polykondensation

Die Polykondensation ist eine Stufenwachstumsreaktion von multifunktionalen Molekülbausteinen. In Bild 2.7 reagieren zwei bifunktionelle Moleküle zu einem Polymer und bilden ein Spaltprodukt wie z. B. Wasser, Ammoniak und Chlorwasserstoff. Werden die Spaltprodukte nicht abgeführt, wird der Reaktionsablauf unterbrochen.



Beispiel: Polyamid 6.6

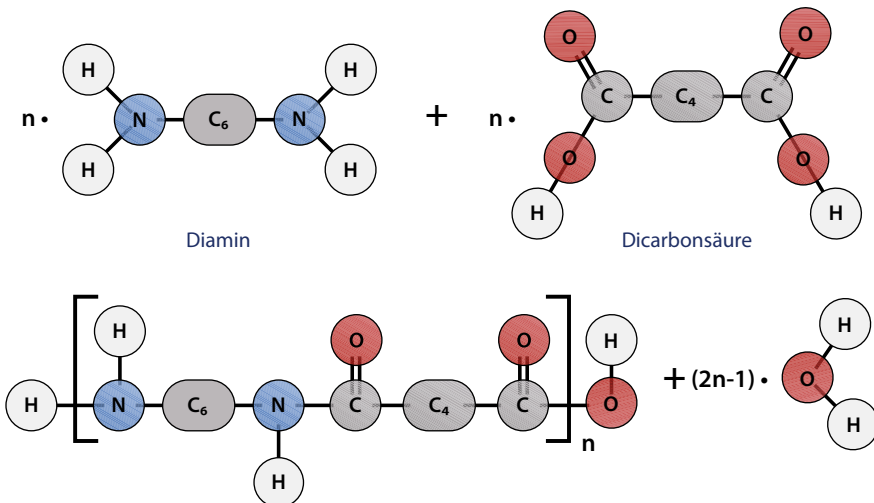


Bild 2.7 Polykondensation

Auf diese Weise wird beispielsweise Polyamid 6.6 (PA66) aus einem bifunktionellen Amin (1,6-Diaminohexan) und einer bifunktionellen Carbonsäure (z.B. Adipinsäure) hergestellt. Es entsteht ein Makromolekül mit einer Amid-Gruppe (CONH) und es wird Wasser als Spaltprodukt abgeführt.

Wie oben unterschieden, handelt es sich bei der Polykondensation um eine Stufenwachstumsreaktion, da neben der Reaktion von einzelnen bifunktionellen Monomeren an eine bestehende Kette auch zwei beliebig lange Ketten miteinander zu einer noch längeren Kette reagieren können. Im Vergleich zur radikalischen Polymerisation führt dies nicht zum Abbruch des Kettenwachstums, da die Kettenenden immer noch funktionelle Gruppen aufweisen und somit weiterhin mit bifunktionellen Monomeren, Oligomeren und Polymeren reagieren können.



QR-Code 2-2

Am Beispiel der Reaktion einer Dicarbonsäure und Hexamethylen-diamin wird die Polykondensation zu Polyamid dargestellt.

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

2.1.2.4 Polyaddition

Auch bei der Stufenwachstumsreaktion Polyaddition reagieren zwei verschiedene multifunktionelle Molekülbausteine (Bild 2.8, hier bifunktionell) miteinander. Dabei entsteht aber kein Spaltprodukt. Die Kopplung der reaktiven Monomere entsteht durch den Platzwechsel eines oder mehrerer Atome, vorzugsweise von Wasserstoffatomen, die sich relativ leicht aus ihrer jeweiligen Endgruppe ($-\text{OH}$, $-\text{NH}_2$, $-\text{COOH}$) lösen. Als Beispiel dient hier die Polyaddition von bifunktionellem Isocyanat mit einem bifunktionellen Alkohol zu thermoplastischem Polyurethan. Vernetztes Polyurethan wird in Abschnitt 3.5.5 „Schäumen von Kunststoffen“ noch detaillierter behandelt.



QR-Code 2-3

Am Beispiel des thermoplastischen Polyurethans wird die Polyaddition erläutert.

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

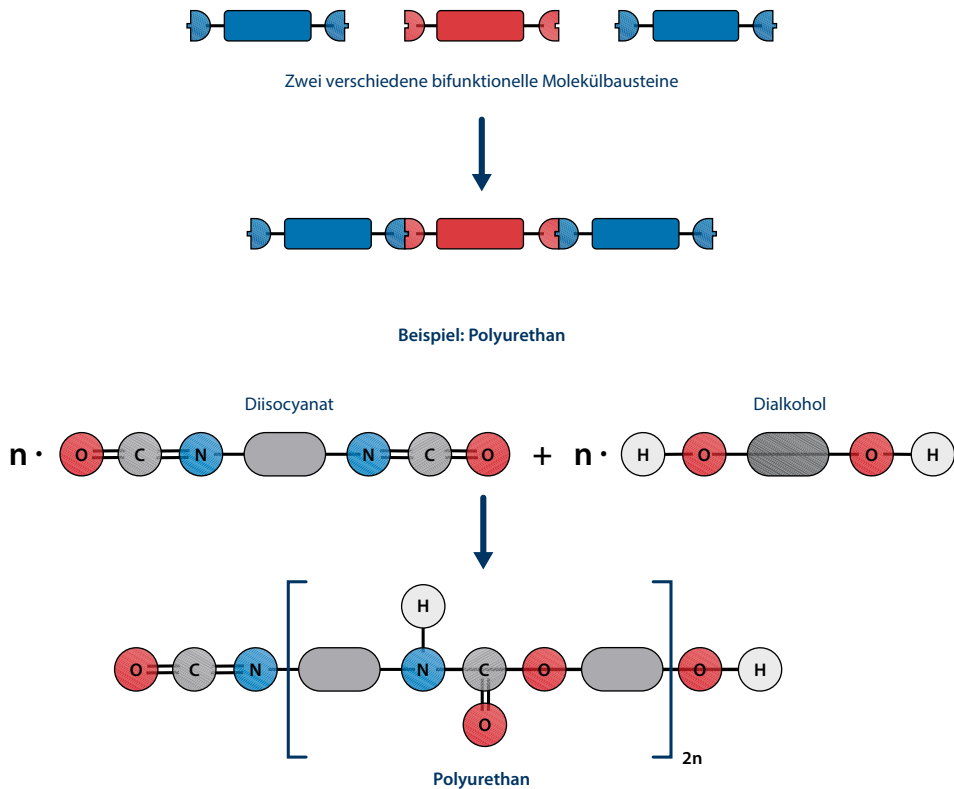


Bild 2.8 Polyaddition

2.1.3 Die Molmasse von Polymeren

Aus dem Schulunterricht ist eventuell noch bekannt, dass die Molmasse (früher Molekulargewicht genannt) aus den Massen der einzelnen Atome zusammenaddiert werden kann. Nun gilt auch, dass die Molmasse eines Makromoleküls aus den Molmassen der einzelnen Monomereinheiten zusammengerechnet werden kann. Dafür muss aber bekannt sein, wie oft die Monomereinheiten in der Polymerkette enthalten sind. Diese Anzahl wird Polymerisationsgrad n genannt. Da nicht alle Ketten der Polymere gleich lang sind, ist n stets nur ein Mittelwert.

Da die Kettenlänge nur ein gemittelter Wert sein kann, kann auch die Molmasse eines Polymers nur ein Mittelwert sein. In Wahrheit liegt eine Molmassenverteilung vor, also kürzere Ketten, mittellange Ketten und längere Ketten, ineinander verknäult. Ein Beispiel für solch eine Molmassenverteilung ist in Bild 2.9 dargestellt.

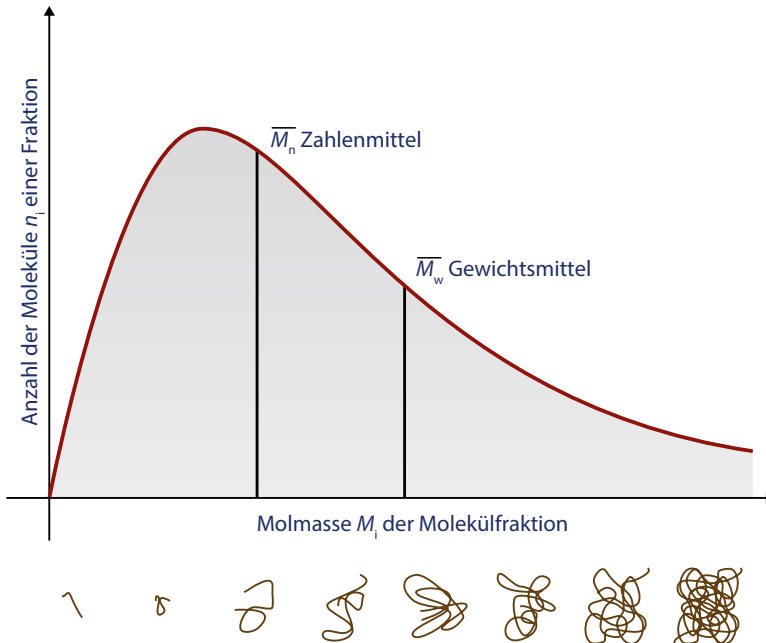


Bild 2.9 Beispiel einer Molmassenverteilung eines Polymers

Es gibt also wenige Moleküle mit sehr geringer Molmasse (siehe Koordinatensprung) und wenige mit sehr hoher Molmasse (nach rechts verlaufend). Dazwischen gibt es eine charakteristische Verteilung, die an einer Stelle ihr Maximum hat. Da einige Eigenschaften der Polymere und der daraus hergestellten Kunststoffe mit der Molmassenverteilung korrelieren, ist deren Kenntnis sehr hilfreich.

Doch wie fasst man eine solche Verteilung in eine einzige Zahl? Es hat sich herausgestellt, dass einige Eigenschaften vom sogenannten Zahlenmittel \overline{M}_n abhängen und andere vom sogenannten Gewichtsmittel \overline{M}_w . Das Zahlenmittel ist einfach die Summe des mathematischen Produkts aus der Anzahl der vorhandenen Einzelmoleküle n_i mal der Molmasse M_i , geteilt durch die Summe der Anzahl der Einzelmoleküle n_i .

$$\overline{M}_n = \frac{\sum_{i=1}^k n_i M_i}{\sum_{i=1}^k n_i} \quad (2.1)$$

Das Gewichtsmittel berücksichtigt zusätzlich das Gewicht der gezählten Moleküllängen und definiert sich über den Massenanteil m_i der Makromoleküle mit der Molmasse M_i .

$$\overline{M_w} = \frac{\sum_{i=1}^k m_i M_i}{\sum_{i=1}^k m_i} \quad (2.2)$$

Je breiter eine Molmassenverteilung, desto weiter voneinander entfernt liegen auch die Werte von Gewichts- und Zahlenmittel. Aus dem Quotienten der beiden Mittelwerte ergibt sich die Polydispersität. Statt der Polydispersität $\left(\frac{\overline{M_w}}{\overline{M_n}}\right)$ wird auch oft die Uneinheitlichkeit U angegeben.

$$U = \frac{\overline{M_w}}{\overline{M_n}} - 1 \quad (2.3)$$

Der Unterschied kann anschaulich an einem Geldbeutel mit Geldmünzen erklärt werden (Bild 2.10). Die 2-€-Münzen entsprechen besonders langen Ketten (hohe Molmassen) und das 1-Cent-Stück ganz kurzen Ketten (geringe Molmassen). Das Zahlenmittel ist der mittlere Wert einer Münze und errechnet sich aus dem Gesamtwert der Münzen, geteilt durch die Gesamtzahl der Münzen:

$$\begin{aligned} \overline{M_n} &= \frac{\sum_{i=1}^k n_i M_i}{\sum_{i=1}^k n_i} = \frac{\sum_{i=1}^k m_i}{\sum_{i=1}^k n_i} = \frac{5 \cdot 0,01 + 15 \cdot 0,02 + 27 \cdot 0,05 + 32 \cdot 0,1 + \dots}{5 + 15 + 27 + 32 + \dots} \\ &= \frac{50}{159} = 0,31 \end{aligned} \quad (2.4)$$

Der zahlenmittlere Wert einer jeden Münze ist also 0,31 €.

Das Gewichtsmittel lässt sich errechnen, indem man die einzelnen Münzstapel an der Bildung der Gesamtsumme nicht im Verhältnis der effektiv vorliegenden Teilchenzahlen (Anzahl der Münzen) teilnehmen lässt, sondern eine Gewichtung der Münzstapel durchführt. Das heißt, es wird das Verhältnis aus der Summe aller Stapelwerte durch die Gesamtsumme (Wert) der Münzen gebildet.

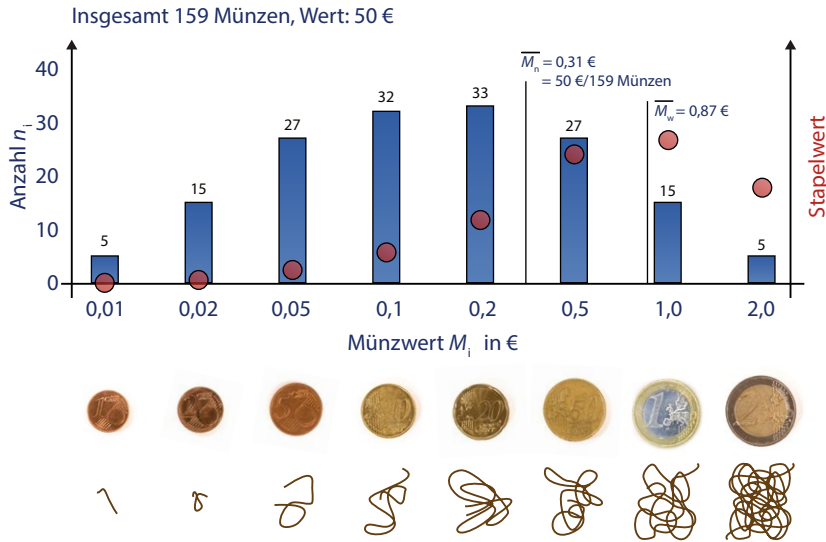


Bild 2.10 Mittelwerte und Verteilungen anschaulich erklärt

Man nimmt also an, im Geldbeutel sind nicht:

Tabelle 2.1 Ermittlung m_i am Beispiel Münzen

n_i	M_i	m_i
5 Münzen zu	0,01	0,05
15 Münzen zu	0,02	0,30
27 Münzen zu	0,05	1,35
32 Münzen zu	0,10	3,20
usw.		

sondern

$m_i \cdot M_i$	m_{F1}
$0,05 \cdot 0,01$	0,0005
$0,30 \cdot 0,02$	0,0060
$1,35 \cdot 0,05$	0,0675
$3,20 \cdot 0,10$	0,3200
usw.	
m_{F1} : Stapelwert	

Für das Gewichtsmittel gilt dann:

$$\begin{aligned} \overline{M}_w &= \frac{\sum_{i=1}^k m_i M_i}{\sum_{i=1}^k m_i} = \frac{\sum_{i=1}^k m_i f_i}{\sum_{i=1}^k m_i} = \frac{0,0005+0,0060+0,0675+0,3200+\dots}{50} \\ &= \frac{43,46}{50} = 0,87 \end{aligned} \quad (2.5)$$

Der gewichtsmittlere Wert einer jeden Münze beträgt also 0,87 €.

Da die Molmasse des Polymeren ein wichtiges Kriterium für verschiedene Eigenschaften des späteren Kunststoffes ist, sollen hier kurz die wichtigsten Verfahren zu deren Bestimmung vorgestellt werden.

Messung mit dem Kapillarviskosimeter

Die Molmasse des Polymeren kann mittels Kapillarviskosimeter, z. B. dem Ubbelohde-Viskosimeter, ermittelt werden (Bild 2.11). Dazu muss das Polymer zuerst durch ein geeignetes Lösungsmittel in Lösung gebracht werden. Nun lässt man ein definiertes Volumen dieser Lösung durch eine Kapillare des Viskosimeters strömen und misst die dazu benötigte Zeit.

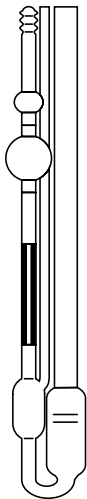


Bild 2.11
Ubbelohde-Viskosimeter

Mithilfe physikalischer Zusammenhänge und mathematischer Beziehungen lässt sich letztendlich die sog. Grenzviskositätszahl („Staudinger-Index“ $[\eta]$) berechnen. Für reale Makromoleküle gilt die Mark-Houwink-Beziehung, mit der sich die zahlenmittlere molare Masse \overline{M}_n errechnet:

$$[\eta] = K \cdot \overline{M}_n^\alpha \quad (2.6)$$

Dabei sind K und α charakteristische Größen, die für eine große Zahl von Polymer-Lösungsmittel-Systemen bei verschiedenen Temperaturen in der Literatur aufgeführt sind. Für lineare, unverzweigte Moleküle (siehe unten „Sekundärstruktur“) nimmt α Werte zwischen $0,5 < \alpha < 1$ an.

Bei dieser Methode handelt es sich um eine Relativmethode. Die Güte der Bestimmung von \overline{M}_n hängt u. a. von der Übereinstimmung der Versuchsbedingungen und der Molmassenverteilung (Polydispersität) des jeweiligen Polymers ab.

Darüber hinaus kann das Polymer statt in Lösung auch in Schmelze gebracht und ebenfalls durch eine Kapillare gedrückt werden. Zur Ermittlung dieses sogenannten Schmelzeindex (MFI = Melt Flow Index) reicht allerdings die Schwerkraft nicht aus und es wird mit der Kraft einiger Gewichtsscheiben nachgeholfen. Die Ergebnisse sind recht schnell zu ermitteln, ergeben aber keinen Wert für eine Molmasse, sondern nur eine indirekte Aussage. Näheres wird im Abschnitt 3.1.6 „Messung der Fließeigenschaften“ erläutert.

Messung mit der Gelpermeationschromatographie

Die Messung mittels Gelpermeationschromatographie (GPC; engl.: SEC = size exclusion chromatography) liefert eine exakte Molmassenverteilung und kann mittels Lichtstreuendetektoren auch absolute Molekülmassen bestimmen. Das zu messende Polymer wird in Lösung auf eine Trennsäule mit poröser Struktur aufgebracht und passiert diese sequenziell (Bild 2.12).

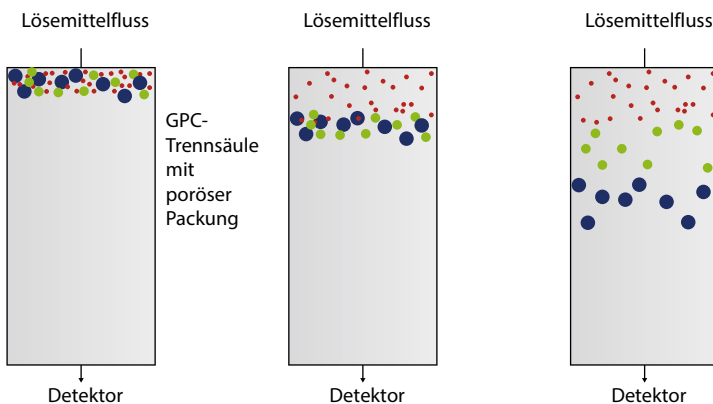


Bild 2.12 Gelpermeationschromatographie (GPC)

Das Prinzip der Gelpermeationschromatographie: Großen Makromolekülen stehen nur wenige Poren zur Verfügung, in die sie sich einlagern können. Deshalb werden sie relativ schnell vom kontinuierlichen Lösungsmittelstrom erfasst und als erstes aus der Trennsäule gespült. Je kleiner ein Makromolekül ist, desto öfter kann es sich auf seinem Weg durch die Trennsäule in einer Pore (quasi im „Windschatten“) fest-

setzen. Das heißt, je kleiner die Makromoleküle, desto später – also zeitlich verzögert – treten sie aus der Säule aus.

2.1.4 Bindungskräfte und Brown'sche Molekularbewegung

Damit die molekularen Bindungskräfte in Polymeren verstanden werden können, ist es nötig, die verschiedenen Bindungskräfte zwischen Atomen aufzufrischen.

2.1.4.1 Innermolekulare chemische Bindungen

Metallische Bindung

In der metallischen Bindung sind die Elektronen in einem Metallgitter (Atomgitter) frei beweglich (Bild 2.13). Die Valenzelektronen (Außenelektronen) der Metallatome können leicht vom Atom abgetrennt werden, da sie nur schwach gebunden sind. Im Metall bildet sich ein Gitter aus positiv geladenen Metall-Ionen, den sogenannten Atomrümpfen. Das nach dem Physiker Enrico Fermi benannte „Elektronengas“ besteht aus freien Außenelektronen. Durch die freie Beweglichkeit kommen die hohe elektrische Leitfähigkeit, der Magnetismus und auch die hohe Wärmeleitfähigkeit von Metallen zustande.

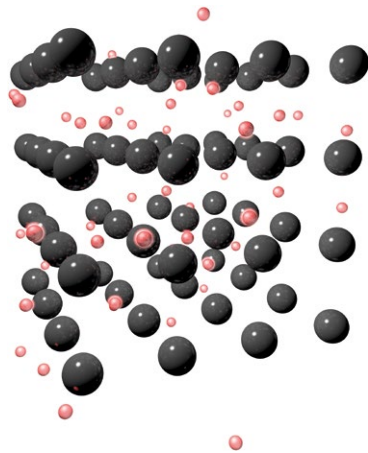
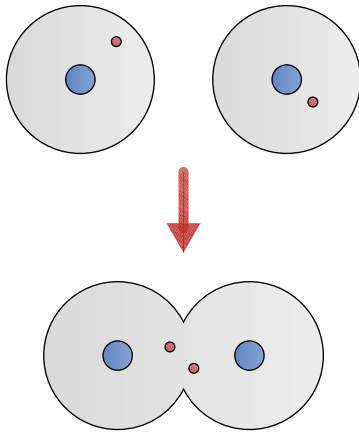


Bild 2.13
Metallische Bindungen

Atombindung

Die Atombindung ist eine chemische Bindung und wird auch Hauptvalenzbindung genannt. Atombindungen bilden sich besonders zwischen Nichtmetallen aus und teilen sich mindestens ein bindendes Elektronenpaar der Außenelektronen (Valenzelektronen) (Bild 2.14). Die Atome in Makromolekülen von Polymeren sind über Hauptvalenzbindungen miteinander verknüpft.

**Bild 2.14**

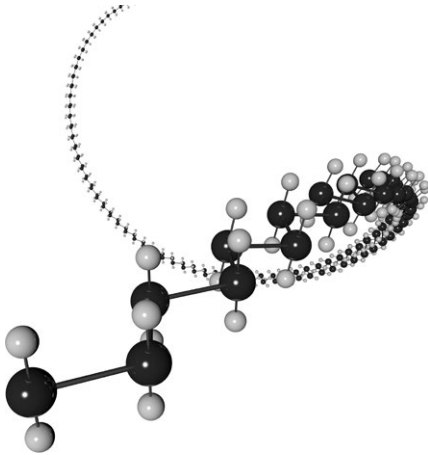
Atombindung am Beispiel des Wasserstoffmoleküls H_2 (auch: kovalente Bindung, Hauptvalenzbindung)

Weitere Bezeichnungen für Atombindungen oder Hauptvalenzbindungen sind: kovalente Bindung, homöopolare Bindung und Elektronenpaarbindung. Eine Atombindung hat eine bestimmte Wirkungsrichtung, ist also eine gerichtete Bindung und bestimmt damit die geometrische Struktur einer Verbindung (im Gegensatz zum Elektronengas). Die Festigkeit einer Bindung wird durch die Bindungsenergie beschrieben. Das Knüpfen oder Trennen einer Atombindung wird ‚chemische Reaktion‘ genannt.

Ebenfalls zur Wiederholung von Schulinhalten soll bei diesen oft eingesetzten Elementen noch an deren Bindigkeit erinnert werden. Ganz allgemein gilt, dass die Atome (Elemente) bei der Ausbildung einer chemischen Bindung bestrebt sind, Edelgaskonfiguration einzunehmen (Schalenmodell: acht Außenelektronen/Valenzelektronen; Ausnahme Wasserstoff: zwei). Elektronen ordnen sich dabei immer paarweise an. Ungebundene Außenelektronen eines Atoms gehen daher eine „Partnerschaft“ mit denen eines anderen Atoms ein – es entsteht ein Molekül. Die Bindungsenergie von Hauptvalenzbindungen können Werte von 40 bis zu 800 kJ/mol annehmen.

Die Anzahl der Atombindungen, die ein Atom eingehen kann, nennt man Bindigkeit. Sie ist abhängig von der Zahl der Außenelektronen. Für die Bindigkeit eines kovalent gebundenen Atoms der IV.–VII. Hauptgruppe des Periodensystems gilt die (8-„minus“-N)-Regel, mit N gleich der Außenelektronenzahl des entsprechenden Atoms. Bei Chlor (Cl), Sauerstoff (O), Stickstoff (N) bzw. Kohlenstoff (C) mit sieben, sechs, fünf bzw. vier Außenelektronen berechnet sich somit eine Bindigkeit von 1, 2, 3 bzw. 4. Das Wasserstoffatom strebt die Konfiguration von Helium (Edelgas) mit zwei Außenelektronen an und kann somit ein Elektron innerhalb einer chemischen Bindung aufnehmen. Das heißt, Wasserstoff ist einbindig. Da der Schwefel (S) in der VI. Hauptgruppe der dritten Periode steht, kann dieser zusätzlich noch sechsbindig sein.

Die Makromoleküle eines Polymers werden durch solche Atombindungen gebildet. Das in Bild 2.15 gezeigte Teilstück eines Polyethylen-Makromoleküls besteht aus etwa 70 Ethylen-Monomereinheiten. Polyethylene haben eigentlich meist sogar 100 000 Wiederholungseinheiten. Diese können aber hier nicht dargestellt werden.

**Bild 2.15**

Teilstück eines Polyethylen-Makromoleküls

Polymere sind organische Verbindungen, da sie – wie alles Leben auf der Erde – auf Kohlenstoff basieren. Wichtige Bestandteile organischer Verbindungen sind neben Kohlenstoff (C) noch Wasserstoff (H), Sauerstoff (O) und Stickstoff (N). Bei Polymeren werden gelegentlich noch die Heteroatome Chlor (Cl), Fluor (F), Schwefel (S) und Silizium (Si) eingesetzt.

2.1.4.2 Intermolekulare physikalische Bindungen

Physikalische Bindungen sind Nebenvalenzbindungen. Sie beschreiben Art und Größe der zwischen den Polymerketten bestehenden Anziehungskräfte. Weitere Bezeichnungen für Nebenvalenzbindungen sind: zwischenmolekulare Kraft, Nebenvalenzkraft und Sekundärbindung. Diese Anziehungskräfte sind stark abstandsabhängig und im Verhältnis zu den Hauptvalenzbindungen 2- bis 2000-mal schwächer.

Dipol-Dipol-Kräfte

Eine sehr starke Nebenvalenzbindung sind Dipol-Dipol-Kräfte. Sie treten zwischen Molekülen mit permanenten Dipolmomenten auf. Ihre Ursache ist in der unterschiedlichen Elektronegativität der chemischen Elemente begründet. Beispielhaft ist im Polyvinylchlorid (PVC) das Chlor-Atom elektronegativer als das Kohlenstoff- und das Wasserstoff-Atom (Bild 2.16, links) und zieht deshalb dessen Elektronen zu sich (Im Orbitalmodell entspricht dies einer unsymmetrischen Elektronenwolke.).

Hierdurch wird ein permanenter Dipol erzeugt: Zwischen den Dipolen benachbarter Polymerketten entstehen Anziehungskräfte, die sogenannten Dipol-Dipol-Kräfte. Deren Bindungsenergie beträgt 1/50 bis 1/200 einer Hauptvalenzbindung.