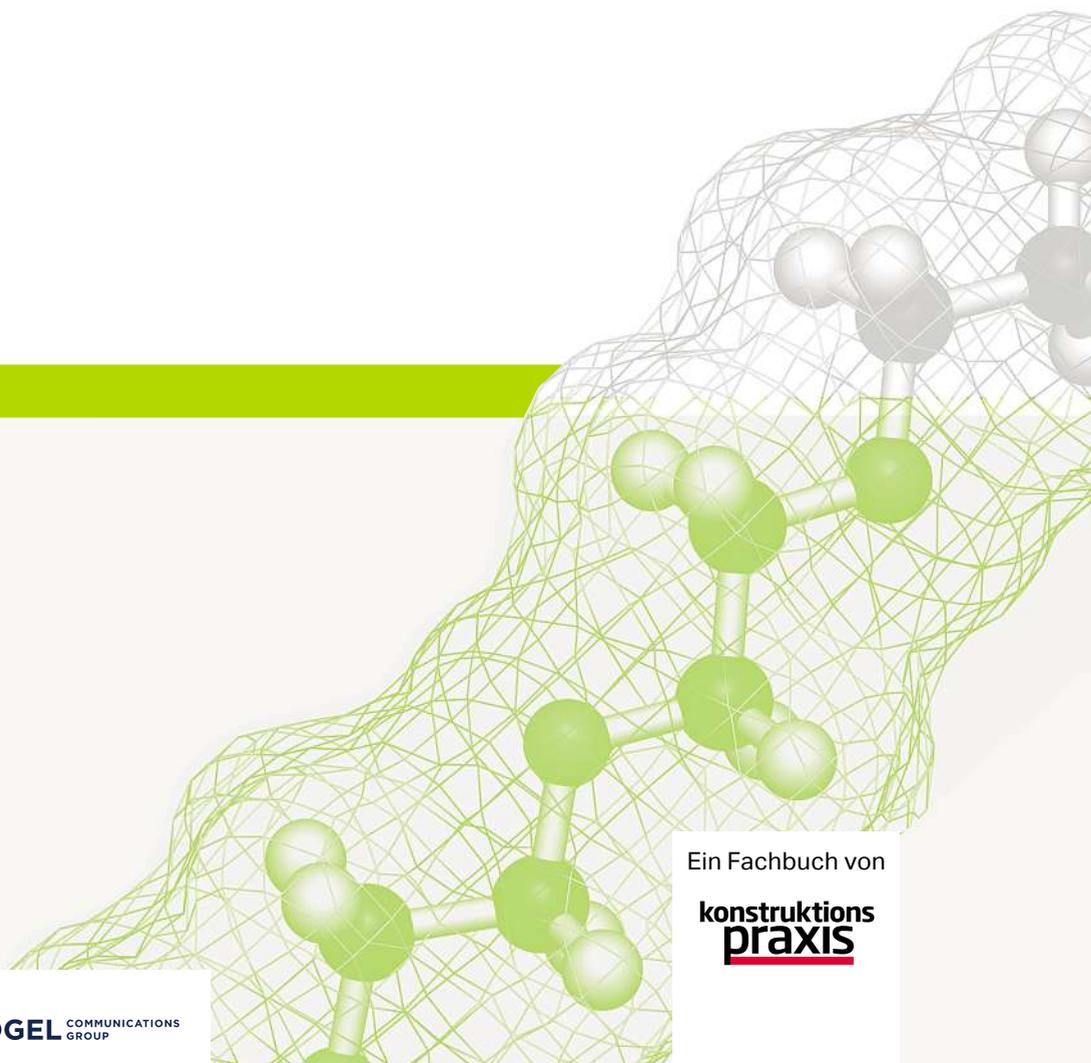


SCHWARZ / EBELING / RICHTER

Kunststoffkunde



Ein Fachbuch von

**konstruktions
praxis**



VOGEL COMMUNICATIONS
GROUP

Schwarz / Ebeling / Richter

Kunststoffkunde

Schwarz / Ebeling / Richter

Kunststoffkunde

Aufbau · Eigenschaften · Verarbeitung ·
Anwendungen der Thermoplaste ·
Duroplaste und Elastomere

Autoren:

Dr.-Ing. Otto Schwarz

Dipl.-Ing. Friedrich-Wolfhard Ebeling

Dipl.-Ing. Harald Huberth

Dipl.-Ing. Frank Richter

Dipl.-Ing. Harald Schirber

Dipl.-Ing. Norbert Schlör

11., überarbeitete Auflage

Vogel Communications Group

Dipl.-Ing. (FH) **FRIEDRICH-WOLFHARD EBELING**

Jahrgang 1936. Nach Chemieingenieurstudium in Nürnberg 6-jährige Industrietätigkeit im Bereich der Aufbereitung und Verarbeitung von Kunststoffen. Von 1965 bis 1999 Lehrtätigkeit für die Gebiete Kunststoffkunde und -Verarbeitung im Süddeutschen Kunststoff-Zentrum (SKZ). Seit 2000, nach Eintritt in den Ruhestand, Lehrbeauftragter beim SKZ, insbesondere für die Industriemeisterausbildung Kunststoff und Kautschuk. Im Jahr 2010 verstorben.

Dipl.-Ing. (FH) **HARALD HUBERTH**

Jahrgang 1955. Studium an der Fachhochschule Würzburg-Schweinfurt zum Diplom-Ingenieur (FH) für Kunststofftechnik. Von 1982 bis 1987 Lehrtätigkeit im Süddeutschen Kunststoff-Zentrum. Von 1987 bis 1994 Leitung der Arbeitsgebiete Seminare bzw. Zweigstellen. Von 1994 bis 2002 Leitung der Aus- und Weiterbildung, danach Geschäftsführer der SKZ-ToP GmbH und ConSem GmbH.

Dipl.-Ing. (FH) **FRANK RICHTER**

Jahrgang 1970. Studierte Polymerchemie an der Fachhochschule Reutlingen. Nach Abschluss der Studiums arbeitete er als Projektingenieur am Institut für Angewandte Forschung in Reutlingen, als Entwicklungsingenieur Kunststoffcompounds bei Ensinger GmbH in Nufringen und leitete anschließend den Geschäftsbereich Rohstoffe/Compounds bei Ensinger GmbH, Nufringen. Seit 2011 ist er freier Berater, Trainer und Gutachter für Kunststoff-Werkstoffe.

Dipl.-Ing. (FH) **HARALD SCHIRBER**

Jahrgang 1938. Nach Werkzeugmacherlehre Studium von 1958 bis 1961 zum Maschinenbauingenieur in Würzburg. 1961 bis 1964 Betriebsingenieur im Automobilbau. 1965 bis 1978 Betriebsassistent und Betriebsleiter im Chemiebaustoffbereich, 1978 bis 1982 Betriebsleiter im Bereich Rohrextrusion. Von 1982 bis 1993 Lehrtätigkeit im Süddeutschen Kunststoff-Zentrum und zuständig für die Entwicklung von Lehrgängen und Fachtagungen, danach, bis zum Eintritt in den Ruhestand 2003, Abteilungsleiter Technik und Konstruktion.

Dipl.-Ing. (FH) **NORBERT SCHLÖR**

Jahrgang 1954. Studium von 1973 bis 1977 an der Fachhochschule Würzburg-Schweinfurt zum Diplom-Ingenieur (FH) für Kunststofftechnik; anschließend 4-jährige Tätigkeit in der kunststoffverarbeitenden Industrie. Von 1981 bis 1993 Lehrtätigkeit im Süddeutschen Kunststoff-Zentrum. Seit 1993 Gruppenleiter Fachtagungen und Seminare.

Dr.-Ing. **OTTO SCHWARZ**

Jahrgang 1929. Studium 1950 bis 1955 an der TH Aachen, Dipl.-Ing. Verfahrenstechnik. Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Kunststoffverarbeitung an der TH Aachen. 1968 Promotion zum Dr.-Ing., 1968 bis 1973 Tätigkeit beim Kunststoffverband in Frankfurt. Seit 1973 im Süddeutschen Kunststoff-Zentrum, 1977 stellvertretender Institutsleiter, 1992 bis 1994 Institutsleiter, 1994 Eintritt in den Ruhestand. Anfang 1997 verstorben.

Weitere Informationen:

www.vogel-professional-education.de

ISBN Print-Ausgabe: 978-3-8343-3540-1 / ISBN E-Book: 978-3-8343-6319-0

11. Auflage 2025

Alle Rechte, auch der Übersetzung, vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf in irgendeiner Form (Druck, Fotokopie, Mikrofilm oder einem anderen Verfahren) ohne schriftliche Genehmigung des Verlages reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden. Hiervon sind die in §§ 53, 54 UrhG ausdrücklich genannten Ausnahmefälle nicht berührt.

Druck: General Nyomda Kft.

6728 Szeged, Kollégiumi út 11/H

Gedruckt auf zertifiziertem Papier mit mineralölfreien Druckfarben

Copyright 1987, 2025 by Vogel Communications Group GmbH & Co. KG, Würzburg

Titelgrafik: © molekuul.be - Fotolia.com

Vogel Communications Group GmbH & Co. KG

Max-Planck-Straße 7/9

97082 Würzburg

Tel.: +49 931 418-0

Fragen zur Produktsicherheit:
produktsicherheit@vogel.de

Geleitwort

Das Lehrbuch «Kunststoffkunde» ist ein Standardwerk, das Ihnen einen guten Überblick über die Grundlagen der Polymerchemie geben und Ihnen im Laufe Ihres Berufslebens immer wieder als Stütze und Nachschlagewerk dienen kann.

Beim erstmaligen Lesen des Buches kam es mir vor, als hätte ich noch einmal mein Grundlagensstudium wiederholt. Das Buch diente mir damals bereits als Lernzettel und Stütze, wurde in der 10. Auflage jedoch um wichtige und hilfreiche Aspekte ergänzt.

Zum Beispiel wurden die Kapitel zur Analytik grundlegend überarbeitet und auf den neuesten Stand gebracht, da es im Bereich der Infrarot-Spektroskopie, der Gas-Chromatografie und auch im Bereich der KI-gestützten Erkennung von Kunststoffen in den letzten Jahren enorme Fortschritte gegeben hat.

Zudem haben sich die Anforderungen an Kunststoffe in den vergangenen Jahrzehnten stark verändert. Mussten Kunststoffe in der Vergangenheit vor allem preiswert und langlebig sein, so liegt der Fokus heute insbesondere auf der Nachhaltigkeit mit einem besonderen Schwerpunkt auf der Kreislaufführung und natürlich auf der Gesundheitsverträglichkeit.

Seit meiner Doktorarbeit zu polymerbasierten Biobrennstoffzellen bin ich immer wieder begeistert vom Potenzial der Kunststoffe, innovative Produkte in unserem Alltag, aber auch in High-Tech Anwendungen, Realität werden zu lassen. Dazu zählen die für die Klimatransformation unerlässlichen erneuerbare Energien wie Solarzellen und Windräder, Produkte der Wärmedämmung, des Brandschutzes, aber natürlich auch die Telekommunikation und Elektromobilität. Auch Infrastrukturanwendungen wie Rohre, Erdkabel, Wasserleitungen, und, Wasserstofftanks, kommen ohne die polymeren Hochleistungswerkstoffe nicht aus. Mir ist es daher ein persönliches Anliegen, in der oft einseitig geführten öffentlichen Debatte um diese Materialklasse zu vermitteln und einen konstruktiven Dialog darüber zu führen, wie wir von dem enormen Potenzial der Kunststoffe profitieren können, ohne vor den mit ihnen noch verbundenen Problemen die Augen zu verschließen.

Als Hauptgeschäftsführerin von PlasticsEurope Deutschland e.V. setze ich mich für Klimaschutz und eine Kreislaufwirtschaft mit Kunststoffen ein. Nachhaltigkeit, das Schließen von Kreisläufen und die Defossilisierung, also der schrittweise Ersatz fossiler Rohstoffe, sind ein unverzichtbarer Bestandteil bei der Bekämpfung des Klimawandels und damit auch langfristig für Wohlstand und soziale Gerechtigkeit.

Die Kunststoffindustrie bekennt sich mit der Plastics Transition Roadmap zum Zielbild der klimaneutralen Kreislaufwirtschaft. Es handelt sich bei der Roadmap um einen konkreten Aktionsplan, der von den europäischen Kunststoffherstellern in Zusammenarbeit mit Deloitte erstellt wurde, um den europäischen Kunststoffsektor bis 2050 vollständig neu zu gestalten und ein «Netto-Null» Emissionsziel zu erreichen.

Werden aktuell rund 20 % der Europäischen Kunststoffe aus nicht-fossilen Rohstoffen hergestellt, soll dieser Anteil bis 2030 auf 25 % und bis 2050 auf 65 % steigen. Um dieses Ziel zu erreichen, werden alle potenziellen Alternativen zu fossilen Rohstoffen erforderlich sein: mechanische Rezyklate, Rohstoffe aus dem chemischen Recycling, Biomasse, und langfristig auch CO₂.

Gleichzeitig spielt auch das Design eine zunehmend wichtige Rolle: wer mitdenkt, wie bereits bei der Herstellung von Produkten aus Kunststoffen der Rohstoffeinsatz minimiert und das Produkt nach der Nutzung länger verwendet, mehrfach genutzt und am Lebensende wieder in den Kreislauf zurückgeführt werden kann, löst viele Probleme bereits in der Herstellungsphase!

Nicht immer ist die Antwort auf die unterschiedlichen Anliegen einfach, denn leicht entstehen die «typischen» Zielkonflikte: langlebige Produkte und manchmal auch besonders leichte Pro-

dukte mit geringem Materialeinsatz zu Beginn können besonders schwierig zu recyceln sein. Hier braucht es kluge Köpfe und neue Impulse – zum Beispiel von Ihnen.

Die Kunststoffhersteller stehen am Anfang der Wertschöpfungskette. Dann kommen die Maschinenhersteller, die Verarbeiter, die Messgerätehersteller, die Inverkehrbringer, die Sammler und Sortierer und die Recycler. Die Zahl der Berufe in unserer Industrie ist unendlich groß und vielfältig, gleichzeitig ist diese Industrie wie eine Familie, in der man sich immer wieder begegnet.

Und das ist auch der Grund, weshalb ich Sie zur Wahl Ihres Studiums bzw. Ihrer Ausbildung beglückwünsche: Die Kunststoffindustrie ist innovativ und verfügt über die Technologien und das Wissen, die großen Herausforderungen unserer Gesellschaft zu lösen. Dazu gehören für mich Klimaschutz, soziale Gerechtigkeit, Hygiene und Gesundheit, Energieversorgung, Wohlstand und Umweltschutz.

Sie haben die Möglichkeit, an Lösungsstrategien für eine bessere Zukunft für alle mitzuarbeiten. Dieses Buch wird Ihnen einen Teil des Handwerkszeugs liefern, das Sie dafür benötigen. Ich wünsche Ihnen viel Freude bei der Lektüre!

Plastics Europe ist der Verband der Kunststoffherzeuger in Deutschland. Er vertritt die politischen und wirtschaftlichen Interessen seiner mehr als 50 Mitgliedsunternehmen und ist ein Fachverband des Verbandes der Chemischen Industrie. PlasticsEurope Deutschland e.V. ist außerdem Teil des europäischen Netzwerks Plastics Europe mit Büros in mehreren großen europäischen Wirtschaftszentren. Die Europa Organisation mit rund 100 Mitgliedsunternehmen steht für mehr als 70 Prozent aller in den 27 EU-Mitgliedsstaaten sowie Großbritannien, Norwegen und der Schweiz produzierten Kunststoffe. Derzeit arbeiten in der gesamten Kunststoffindustrie EU-weit nahezu 1,5 Millionen Menschen in etwa 52.000 Unternehmen. Wir als Verband nehmen Ihre Ansprüche an die Zukunft ernst und werden unser Bestmögliches tun, um an dieser zu arbeiten.

Dr. Christine Bunte
Hauptgeschäftsführerin
PlasticsEurope Deutschland e.V.



Vorwort

Kunststoffe spielen in unserem modernen Leben eine zentrale Rolle. Sie begegnen uns in allen Bereichen: Von Verpackungen unserer Lebensmittel über sämtliche Transportmittel bis hin zur Medizintechnik.

Was genau kennzeichnet diese vielfältigen Werkstoffe? Wie werden sie hergestellt? Welche Eigenschaften weisen sie auf? Welche Herausforderungen sind mit der Anwendung verbunden?

In diesem Buch nehmen wir Sie mit auf eine Reise durch die Welt der Kunststoffe. Wir werden ihre chemische Struktur erforschen, ihre vielfältigen Eigenschaften beleuchten und ihre Anwendungen in verschiedenen Branchen zeigen. Selbstverständlich finden Sie auch ausführliche Informationen zu den wichtigsten Prüfverfahren für Kunststoffe.

Als Standardwerk über die letzten Jahrzehnte wurde die Kunststoffkunde laufend an aktuelle Themen und Entwicklungen angepasst. In dieser mittlerweile 11. Auflage der Kunststoffkunde wurde als Schwerpunkt die Einführung in die Kunststoff-Chemie überarbeitet und ergänzt.

Möge dieses Buch dazu beitragen, Ihr Verständnis für Kunststoffe zu vertiefen und Sie dazu inspirieren, neue Wege im Umgang mit diesen faszinierenden Materialien zu beschreiten.

Reutlingen, Februar 2025

Frank Richter

Inhaltsverzeichnis

Geleitwort	5
Vorwort	7
1 Das Kunststoffgebiet	13
1.1 Entwicklungsgeschichte	13
1.2 Einführung in die Kunststoff-Chemie	14
1.2.1 Stoffe, Materie	14
1.2.2 Chemische Verbindungen, Elemente, Atome, Moleküle	15
1.2.3 Organische Kohlenwasserstoffverbindungen	17
1.2.4 Funktionelle Gruppen	20
1.2.5 Chemische Reaktionen	22
1.2.6 Vom Rohöl zum Monomer	24
1.2.7 Polyreaktionen	27
1.3 Aufbau, Struktur und Zustandsbereiche	35
1.3.1 Bindungskräfte	35
1.3.2 Ordnungszustände	39
1.3.3 Eigenschaftsverändernde Faktoren	40
1.3.4 Technologisches Verhalten in Abhängigkeit von der Temperatur	44
1.4 Rezeptierung	47
1.4.1 Zusatz- und Hilfsstoffe für Kunststoffe	48
1.4.2 Zusatz- und Hilfsstoffe für Kautschuke	59
1.5 Lieferformen für Kunststoffherzeugnisse	63
1.5.1 Formmassen	63
1.5.2 Halbzeug und Formteile	64
2 Thermoplaste	67
2.1 Polyethylen (PE)	67
2.1.1 PE-Sondertypen	71
2.2 Polypropylen (PP)	72
2.2.1 Metallocen-PP-Polymere	76
2.3 Polymethylpenten (PMP)	77
2.4 Cycloolefin(-Co)polymere (COP / COC)	78
2.5 Polybutylen (Polybuten, PB)	80
2.6 Polyisobutylen (PIB)	80
2.7 Ionomere	81
2.8 Polyvinylchlorid (PVC)	82
2.8.1 PVC-Modifikationen	89
2.9 Polyvinylidenchlorid (PVDC)	90
2.10 Polyvinylalkohol (PVAL)	91
2.11 Polyvinylacetat (PVAC)	92
2.12 Polystyrol (PS) und Styrol-Copolymerisate	93
2.12.1 Polystyrolschaum	95
2.12.2 Polystyrol schlagfest (SB)	97
2.12.3 Styrol-Acrylnitril-Copolymerisat (SAN)	99
2.12.4 Acrylnitril-Butadien-Styrol-Terpolymere (ABS)	100
2.12.5 Acrylester-Styrol-Acrylnitril-Terpolymere (ASA)	103

2.13	Polymethylmethacrylat (PMMA), Acrylglas	104
2.14	Polyacrylnitril (PAN)	107
2.15	Polyvinylcarbazol (PVK)	109
2.16	Polyacetal (POM)	111
2.17	Polyketone (PK)	114
2.18	Fluorpolymere	115
2.18.1	Polytetrafluorethylen (PTFE)	116
2.18.2	Perfluorethylenpropylen-Copolymer (FEP)	118
2.18.3	Perfluoralkoxy-Copolymer (PFA/MFA)	118
2.18.4	Polychlortrifluorethylen (PCTFE)	119
2.18.5	Ethylen-Tetrafluorethylen-Copolymer (ETFE)	120
2.18.6	Ethylen-Chlortrifluorethylen-Copolymer (E-CTFE)	120
2.18.7	Polyvinylidenfluorid (PVDF)	121
2.18.8	Polyvinylfluorid (PVF)	121
2.18.9	Terpolymer aus Tetrafluorethylen, Hexafluorpropylen und Vinylidenfluorid (THV)	123
2.19	Polyamide (PA)	124
2.20	Polycarbonat (PC)	129
2.21	Polyester	133
2.22	Polyphenylenether (PPE)	137
2.23	Polysulfone	139
2.24	Polyphenylensulfid (PPS)	142
2.25	Polyaryletherketone	144
2.26	Polyetherimide (PEI)	146
2.27	Polyamidimid (PAI)	148
2.28	Celluloseester (CA, CP, CAB)	149
2.29	Polyblends	152
2.30	Thermoplastische Elastomere	153
2.31	Flüssigkristalline Kunststoffe	158
2.32	Biopolymere	160
3	Duroplaste	163
3.1	Phenol-Formaldehyd (PF)	163
3.2	Harnstoff-Formaldehyd (UF)	168
3.3	Melamin-Formaldehyd (MF)	169
3.4	Melamin-Phenol-Formaldehyd (MPF)	170
3.5	Ungesättigte Polyesterharze (UP-Harze)	171
3.6	Siliconharze (SI)	179
3.7	Polyimide (PI)	180
3.8	Epoxidharze (EP-Harze)	182
3.9	Vernetzte Polyurethane	187
3.9.1	PUR-Schäume	190
3.9.2	Polyurethan-Gießharze	194
3.9.3	PUR-Lacke	196
3.9.4	PUR-Klebstoffe	196
4	Elastomere	197
4.1	Naturkautschuk (NR)	197

4.2	Isoprenkautschuk (IR)	200
4.3	Styrol-Butadien-Kautschuk (SBR)	201
4.4	Butadienkautschuk (BR)	203
4.5	Butylkautschuk (Isobutylene-Isopren-Kautschuk) (IIR)	204
4.6	Chloroprenkautschuk (CR)	205
4.7	Acrylnitril-Butadien-Kautschuk, Nitrilkautschuk (NBR)	207
4.8	Polyurethan-Elastomere (PUR-Elastomere)	209
4.8.1	PUR-Gießelastomere	209
4.8.2	Thermoplastische Polyurethan-Elastomere (TPU)	211
4.8.3	Polyurethankautschuk (AU/EU)	211
4.9	Ethylen-Propylen-Kautschuk (EPM/EPDM)	213
4.10	Ethylen-Vinylacetat-Kautschuk (EAM)	215
4.11	Polysulfidkautschuk (Thioplaste) (TM)	216
4.12	Epichlorhydrinkautschuk (CO, ECO, ETER)	218
4.13	Chlorsulfoniertes Polyethylen (CSM)	219
4.14	Fluorkautschuk (FKM)	220
4.15	Silikonkautschuk (Q)	221
5	Analytik	225
5.1	Einfache Methoden zum Identifizieren von Kunststoffen	225
5.1.1	Voruntersuchungen	225
5.1.2	Dichte	226
5.1.3	Löslichkeit	227
5.1.4	Thermisches Verhalten	228
5.1.5	Brandprobe	229
5.2	Differential Scanning Calorimetrie (DSC)	232
5.3	Thermogravimetrie (TGA)	233
5.4	Infrarot-Spektroskopie (IR)	234
5.5	Gas-Chromatografie (GC)	235
5.6	REM / EDX	236
6	Grundlagen der Kunststoffprüfung	239
6.1	Verarbeitungseigenschaften von Formmassen	240
6.1.1	Schmelzindexprüfung (DIN EN ISO 1133)	240
6.1.2	Viskositätszahl/K-Wert (DIN EN ISO 1628)	243
6.1.3	Bestimmung der Rohdichte (DIN EN ISO 1183)	245
6.1.4	Schüttdichte, Stopfdichte und Füllfaktor (DIN EN ISO 60, DIN EN ISO 61, DIN ISO 171)	246
6.1.5	Rieselfähigkeit (DIN EN ISO 6186)	248
6.1.6	Korngröße und Kornverteilung (DIN 53477)	248
6.1.7	Restfeuchtigkeit	248
6.2	Mechanische Eigenschaften	249
6.2.1	Zugversuch (DIN EN ISO 527)	249
6.2.2	Biegeversuch (DIN EN ISO 178)	251
6.2.3	Bestimmung des Elastizitätsmoduls	254
6.2.4	Schlagbiegeversuch (DIN EN ISO 179)	254
6.2.5	Härteprüfungen	256
6.2.6	Reibung und Verschleiß	257

6.3	Thermische Eigenschaften	257
6.3.1	Wärmeleitfähigkeit (DIN EN ISO 22 007)	257
6.3.2	Wärmeausdehnung (ISO 11 359)	258
6.3.3	Spezifische Wärmekapazität	259
6.3.4	Formbeständigkeit in der Wärme	259
6.3.5	DMTA (Dynamisch-Mechanische Thermo-Analyse)	260
6.4	Elektrische Eigenschaften	261
6.4.1	Elektrische Widerstandswerte (DIN IEC 60 093 VDE 0303/30)	261
6.4.2	Dielektrische Eigenschaften (DIN IEC 60 250)	265
6.4.3	Kriechstromfestigkeit (DIN EN 60 112)	265
6.4.4	Lichtbogenfestigkeit (DIN VDE 0303)	266
6.4.5	Durchschlagfestigkeit (DIN EN 60 243-1)	266
6.4.6	Elektrostatische Aufladung (DIN VDE 0303, DIN 53 486)	266
6.4.7	Verhalten bei Glimmentladungen (DIN EN 60 343)	267
6.5	Beständigkeiten	267
6.5.1	Lösemittelbeständigkeit	267
6.5.2	Spannungsrisssbildung	268
6.5.3	Chemische Beständigkeit	271
6.5.4	Witterungsbeständigkeit	272
6.5.5	Strahlenbeständigkeit	273
6.5.6	Brandverhalten	273
6.6	Prüfung von Kautschuk und Gummi	274
6.6.1	Prüfungen am Rohkautschuk und an unvulkanisierten Mischungen	275
6.6.2	Prüfungen am Vulkanisat	277
6.7	Langzeitverhalten der Kunststoffe	281
6.7.1	Viskoelastizität	281
6.7.2	Statisches Langzeitverhalten (DIN EN ISO 899-1/-2)	283
6.7.3	Dynamisches Langzeitverhalten (DIN 53 442)	288
6.8	Weitere Prüfungen	290
6.8.1	Prüfung an Fertigteilen	291
6.8.2	Qualitätssicherung und -Überwachung	292
6.8.3	Product Compliance	293
	Kurzzeichen für Polymere in Anlehnung an DIN EN ISO 1043-1	295
	Quellenverzeichnis	297
	Stichwortverzeichnis	299

1 Das Kunststoffgebiet

1.1 Entwicklungsgeschichte

Die Entwicklungsgeschichte der Kunststoffe beginnt gegen Ende des 19. Jahrhunderts. Eine stark fortschreitende Industrialisierung forderte neue Werkstoffe mit Eigenschaften, die mit den bis dahin bekannten Werkstoffen wie Metallen, Glas, Keramik und Naturstoffen nur schwer umsetzbar waren. Es begann die Suche nach Materialien mit besonderen Eigenschaften, die in großer Menge günstig verfügbar und dazu noch zu leicht zu verarbeiten waren. Experimentierfreudige Forscher und neugierige Chemiker taten das, was Alchimisten in den Jahrhunderten zuvor bereits auf der Suche nach der Herstellung von Gold getan haben: Sie mischten und kochten fleißig verschiedenste Substanzen miteinander. Im ersten Schritt wurde mit Naturstoffen wie Cellulose und Kautschuk experimentiert. Das Ergebnis waren Produkte wie Cellulosenitrat und dauerhaft elastischer Gummi. Eine Kategorie neuer Werkstoffe war auf dem Markt. Damit waren auf einmal völlig neue Produkte herstellbar – beispielsweise transparente flexible Filme oder vollkommen wasserdichte Zelte und Bekleidung. Im zweiten Schritt wurden anstelle der Naturstoffe als Rohstoffbasis preisgünstige und in großen Mengen zur Verfügung stehende Erdölbestandteile für die weiteren Entwicklungen verwendet.

Das erste auf diesem Weg hergestellte Produkt wurde 1907 von LEO BAEKELAND in den USA patentiert. In Anlehnung an den Namen des Erfinders wurde das Material «Bakelit» genannt. Im Gegensatz zu den bis dato bekannten abgewandelten Naturstoffen bestand dieser Werkstoff rein aus Erdölbestandteilen, er war also ein «Kunststoff». Mit diesem Werkstoff konnten einfache Bauteile wie Gehäuse und Griffe hergestellt werden. Der Rohstoff ließ sich in Formen pressen und war nach dem Aushärtungsprozess meist ohne zeitintensive Nachbearbeitung direkt verwendbar. Die einfache Möglichkeit der Formgebung verlieh diesen Werkstoffen einen weiteren Namen: «Plastik».

Heute kennen wir eine enorme Vielzahl an weiteren Kunststoffen. Aus den ersten Experimenten mit den Naturstoffen hat sich ein völlig neuer Bereich in der Chemie – die makromolekulare Chemie – entwickelt. Wir setzen heute Kunststoffe in allen Lebensbereichen ein – oft ohne dass sie überhaupt noch bewusst wahrgenommen werden. Leider wird in der heutigen Zeit eher über die negativen Auswirkungen des Einsatzes von Kunststoff diskutiert, beispielsweise über die Ansammlung von Kunststoffabfällen in unseren Meeren – die Kehrseite der günstigen und dauerhaften Werkstoffe. Wer heute in einer Suchmaschine bei der Bildersuche «Plastik» eingibt, findet hauptsächlich Bilder von Müllansammlungen. Dabei werden die positiven Seiten, die unser heutiges Leben begleiten, gerne übersehen. Kein elektronisches Gerät funktioniert ohne Isolierung der Kabel, Autos ohne Lackierung und Bereifung sind selten anzutreffen, und Infusionsschläuche in der Medizintechnik aus Glas oder Holz machen ebenso wenig Sinn. Wichtig ist daher eine differenzierte Betrachtung und ein nachhaltiger Umgang mit dem Werkstoff «Kunststoff». Einen begrenzt zur Verfügung stehenden Rohstoff einfach wegzuerwerfen ist definitiv nicht nachhaltig. Die Vermeidung unnötiger Abfälle und die sinnvolle Wiederverwertung gebrauchter Produkte muss daher ein vorrangiges Ziel unserer Gesellschaft sein. Der Trend des verstärkten Einsatzes von biobasierten und biologisch abbaubaren Kunststoffen geht bereits eindeutig in diese Richtung.

Kunststoffe sind chemisch gesehen «Polymere». Sie bestehen aus vielen (griech.: *poly* = viele) kleinen einzelnen Molekülen (griech.: *meros* = Teilchen), die zu einem sehr großen Molekül

verkettet wurden. Das Polymer mit der größten Produktionsmenge weltweit ist das Naturprodukt Cellulose. Nahezu alle Pflanzen produzieren dieses Polymer als Stützstruktur. Auch die Erbsubstanz, die DNA, ist ein Polymer. Sie setzt sich aus der Verkettung von vier organischen Molekülen zusammen (Adenin, Guanin, Cytosin und Thymin). Durch die Reihenfolge der Verkettung wird die komplette Erbinformation aller Lebewesen in biologischer Form gespeichert.

Die Grenzen zwischen natürlichen und synthetischen Polymeren (den «Kunststoffen») verwischen, wenn natürliche Ausgangsbausteine, wie Milchsäure, zur Herstellung eingesetzt werden. Durch Verkettung entsteht die Polymilchsäure (Polylactid), ein thermoplastisch verarbeitbarer Kunststoff. Die Produkte daraus unterscheiden sich optisch nicht von Produkten aus synthetisch hergestelltem Kunststoff.

Allerdings sind Moleküle nur unter bestimmten Voraussetzungen (die in diesem Abschnitt näher behandelt werden) zu Polymeren verknüpfbar. Da die kommerziell interessanten Ausgangsprodukte in den letzten Jahrzehnten bereits ausführlich untersucht wurden, kamen in den letzten Jahren praktisch keine grundlegend neuen Kunststoffe mehr auf den Markt. Die Entwicklung geht vielmehr in Richtung der Kombination der einzelnen Moleküle zu modifizierten Polymeren. Neben der chemischen Struktur eines Polymers tragen auch die Zusatzstoffe maßgeblich zu den Eigenschaften eines Werkstoffes bei. Neue Füllstoffe wie Carbon-Nanotubes, Graphene und wärmeleitfähige Mineralien stellen nur eine kleine Auswahl dar. Der Werkstoff «Kunststoff» darf daher nicht allein als Polymer gesehen werden. Dies ist insbesondere auch dann wichtig, wenn es um die Einhaltung von gesetzlichen Vorschriften wie REACH und RoHS oder Lebensmittelkontaktmaterialien geht. Eine genaue Beurteilung der Werkstoffe setzt die Kenntnis aller möglichen Inhaltsstoffe voraus.

Für die Kombination von Kunststoffen mit Füllstoffen und Additiven sind keine großchemischen und teuren Polymerisationsanlagen erforderlich. Kommerzielle Rührwerke, Knetter oder Compoundierextruder liefern individuell angepasste Werkstoffe von einem bis zu hunderttausenden Kilogramm. Damit können auch kleinere und mittelständische Unternehmen eigene Werkstoffe in kurzer Zeit kostengünstig modifizieren oder komplett neu entwickeln. Auf diesem Weg steht somit eine nahezu unendliche Materialvielfalt zur Verfügung.

Die Entwicklung bleibt also spannend.

1.2 Einführung in die Kunststoff-Chemie

1.2.1 Werkstoffe

Werkstoffe verwenden Menschen schon immer in allen Lebensbereichen, von der Bekleidung über Werkzeuge bis zu ihren Behausungen. In der Entwicklungsgeschichte der Menschheit haben Werkstoffe immer eine grundlegende Rolle gespielt. Sogar die Epochen der Menschheitsgeschichte werden teilweise danach benannt: Steinzeit, Bronzezeit, Eisenzeit und auch Ölzeitalter.

Das Wissen um Werkstoffe wurde ständig weiterentwickelt und verfeinert. Neue Werkstoffe kamen hinzu, bestehende wurden verbessert. Anfangs wurden ausschließlich bereits vorhandene Naturstoffe wie Holz, Stein, Knochen, Fell eingesetzt. Im Laufe der Zeit lernte man, dass sich aus bestimmtem Gestein – den Erzen – Metalle extrahieren lassen. Die Begriffe Werkstoff und Material werden meist gleichbedeutend verwendet.

Die Umwandlung von Materie hat schon immer eine Faszination auf Menschen ausgeübt. So ist der mittelalterliche Eifer bei der Suche nach dem Stein der Weisen nicht weiter verwunderlich. Mit diesem Stein sollte man einfache Materie in Gold umwandeln können, einfach indem man

die Materie an dem Stein reibt. Geklappt hat es bisher nicht – oder vielleicht wurde das ja auch nur verschwiegen.

Aber natürlich gab es auch positive Ergebnisse der Werkstoffexperimente, sie führten neben der Entdeckung der Metalle auch zu Werkstoffen wie Glas, Keramik und Kunststoffe. Parallel zur Entdeckung der neuen Materialien wurden Werkstoffe zu allen Zeiten auch weiterentwickelt. Ein Kirchenglas aus dem Mittelalter hat eine andere Qualität als das Material einer Windschutzscheibe. Auch ein altes römisches Schwert hatte nicht die Legierungszusammensetzung eines heutigen Küchenmessers.

Werkstoffe setzen sich in den meisten Fällen aus verschiedenen einzelnen Substanzen zusammen. Substanzen sind chemische Stoffe, das Wort kommt von dem Lateinischen *substare*: dar-unterstehen, dabei sein.

Holz setzt sich beispielsweise aus Substanzen wie Cellulose, Lignin, Terpene, Wasser, etc. zusammen.

Auch Kunststoffe bestehen in der Regel aus verschiedenen Substanzen, beispielsweise: Polymere, Verstärkungsfasern, Stabilisatoren oder Farbpigmente. Keramik besteht aus verschiedenen Mineralien.

Substanzen können fest, flüssig und gasförmig sein. Diese Zustandsformen werden in der Chemie als Aggregatzustände bezeichnet. Werkstoffe basieren meist auf festen Substanzen. Ausnahmen sind flüssige Substanzen wie Wasser in Holz oder Weichmacher in Kunststoffen.

Die meisten Werkstoffe oder Materialien lassen sich auf physikalischem Weg in die einzelnen chemischen Substanzen auftrennen, beispielsweise durch Erhitzen (Destillieren, Schmelzen), Zerkleinern oder Sieben. Die Chemie beginnt an der Stelle, an der keine weitere physikalische Trennung oder Zerkleinerung mehr möglich ist.

1.2.2 Chemische Verbindungen, Elemente, Atome und Moleküle

Chemische Verbindungen können Substanzen verschiedener Art sein. Man unterscheidet dabei hauptsächlich in

- Anorganische Substanzen: Kohlenstoff-freie Verbindungen, z. B. Kochsalz, Wasser, Rost,
- Organische Substanzen: Kohlenstoff-haltige Verbindungen, z. B. Zucker, Cellulose, Kunststoffe.

Kunststoffe sind nahezu ausschließlich organische Verbindungen. Ein Grenzfall sind Silikone, deren chemisches Grundgerüst überwiegend auf Silicium basiert.

MERKSATZ

Chemische Verbindungen lassen sich mit rein physikalischen Methoden nicht weiter trennen. Diese kleinste Einheit wird als Molekül bezeichnet (lat. *molecula*: kleine Masse).



Ein Molekül setzt sich aus mindestens zwei miteinander verbundenen Atomen zusammen. Moleküle können sowohl aus gleichen Atomen (z. B. Sauerstoff O_2) als auch aus unterschiedlichen Atomen (wie CO_2) aufgebaut sein.

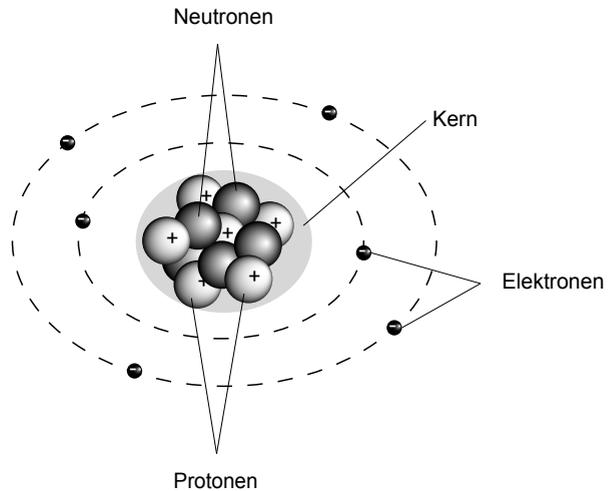
Elemente und Atome

Chemische Elemente bestehen aus Atomen. Diese Atome können auch auf chemischem Wege nicht mehr weiter zerkleinert werden (griech. *atomos*: nicht teilbar). Lange Zeit war man von

dieser «Unteilbarkeit» überzeugt, bis man Anfang des 20. Jahrhunderts feststellte, dass auch diese Atome aus noch kleineren Teilchen bestehen. Ein einfaches Atom-Modell lässt sich am Beispiel des Elementes Kohlenstoff darstellen (Bild 1.1).

Bild 1.1

Kohlenstoffatom



Protonen sind positiv geladene Teilchen, die sich im Kern zusammen mit den neutral geladenen Neutronen befinden. Die negativ geladenen Elektronen umkreisen den Kern. In einem Atom befinden sich die gleiche Anzahl von Protonen und Elektronen, sodass sich die Ladungen ausgleichen.

Das am häufigsten in der Natur vorkommende Element ist Kohlenstoff (ca. 99 %), das Atom hat sechs Protonen, sechs Neutronen und sechs Elektronen. Alle Atome mit der gleichen Protonen-Zahl gehören zum gleichen Element. Bei manchen Elementen gibt es Varianten mit unterschiedlichen Neutronen-Zahlen, sie werden als Isotope bezeichnet. Beim Kohlenstoff gibt es noch weitere Isotope – also mit sechs Protonen und Elektronen –, die nicht sechs, sondern sieben bzw. acht Neutronen haben.

Die Anzahl der Protonen eines Elementes wird in der Chemie als Ordnungszahl bezeichnet. Entsprechend der Ordnungszahl können die Elemente im Periodensystem der Elemente eingeordnet werden.

Moleküle und Verbindungen

Durch die chemische Verbindung von Atomen erhält man Moleküle.

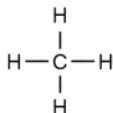


MERKSATZ

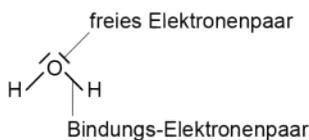
Die kleinste Einheit der chemischen Verbindung ist das Molekül.

Die Bindungskräfte zwischen den Atomen können mit der Valenzbindungstheorie erklärt werden, sie wird auch als Elektronen-Paar-Theorie bezeichnet. In dieser Theorie kann jedes Atom eine bestimmte Anzahl von Elektronen für eine Bindung zu einem anderen Atom zur Verfügung stellen. Diese Anzahl wird auch als Valenz bezeichnet.

Eine Bindung zwischen Atomen entsteht dadurch, dass einzelne Elektronen zu einem Paar zusammenfinden – daher die Bezeichnung Elektronen-Paar-Theorie. Kohlenstoff stellt beispielsweise vier Elektronen für eine Bindung zur Verfügung, Wasserstoff nur eine. Somit kann ein Kohlenstoff-Atom im einfachsten Fall eine Verbindung mit vier Wasserstoff-Atomen eingehen, dann entsteht Methan:



Diese Elektronen-Bindungen werden in chemischen Strukturformeln vereinfacht als Strich dargestellt. Elektronen, die ein Atom nicht für eine Bindung mit einem anderen Atom zur Verfügung stellt, werden auch als freie Elektronenpaare bezeichnet. Beispielsweise stellt Sauerstoff für eine Bindung nur zwei Elektronen zur Verfügung. In Kombination mit zwei Wasserstoff-Atomen ergibt sich das Wassermolekül:



Durch die unterschiedlichen Ladungen von Atomen kommt es zu einer Verschiebung der Ladungsschwerpunkte in Bindungen. Das Ergebnis ist die Ausbildung von Bindungswinkeln zwischen den Atomen. Bei Wasser beispielsweise beträgt der Bindungswinkel zwischen Sauerstoff- und Wasserstoff-Atomen ca. $104,5^\circ$. Zur übersichtlicheren Darstellung wird in vielen Strukturformeln kein Bindungswinkel dargestellt, sondern die vereinfachte lineare Form gewählt.

Soll die Struktur gar nicht dargestellt werden, kann man chemische Verbindungen auch mit der Summenformel angeben, die sich auch in Text einfach einbinden lässt. Dabei werden alle Atome eines Moleküls aufsummiert und die Anzahl als tiefgestelltes Zeichen angegeben. Methan hat die Summenformel CH_4 , Wasser H_2O .

1.2.3 Organische Kohlenwasserstoffverbindungen

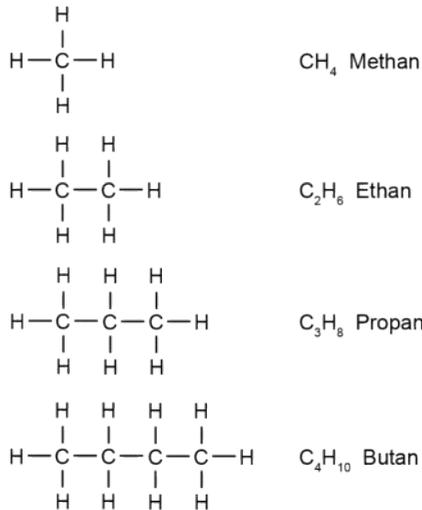
Verbindungen der Elemente Kohlenstoff und Wasserstoff werden als Kohlenwasserstoffe bezeichnet. Durch unterschiedliche Bindungen gibt es verschiedene Kombinationsmöglichkeiten dieser Elemente.

Kunststoffe basieren in der Regel auf Verbindungen des Elementes Kohlenstoff und sind daher organische Verbindungen. Ausnahme ist das Silikon, hier ist der Kohlenstoff durch das Element Silicium ersetzt.

Neben Kohlenstoff und Wasserstoff können weitere Atome in Kunststoffen enthalten sein. Diese Atome werden auch als Hetero-Atome bezeichnet. Beispiele sind Chlor in Polyvinylchlorid (PVC) oder Fluor in Polytetrafluorethylen (PTFE).

Gesättigte Kohlenwasserstoffe

Als gesättigte Verbindungen werden in der organischen Chemie Verbindungen bezeichnet, bei denen alle Kohlenstoff-Atome mit einer einfachen Bindung verbunden sind. Die einfachsten Strukturen sind dabei die sogenannten Alkane. Die Kohlenstoffatome sind hier mit einer Einfach-Bindung linear angeordnet:

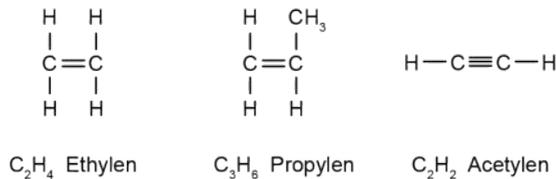


MERKSATZ

Die linear gesättigten Kohlenwasserstoffe werden auch als Paraffine bezeichnet. Der Name leitet sich aus dem Lateinischen ab und bedeutet «reaktionsträge». Die allgemeine Summenformel für Alkane bzw. Paraffine lautet C_nH_{2n+2}.

Ungesättigte Kohlenwasserstoffe

Neben der einfachen Bindung können Kohlenstoff-Atome auch durch Doppel- oder Dreifach-Bindungen miteinander verbunden sein. Diese Moleküle nennt man auch ungesättigte Kohlenwasserstoffe.



Bei einer Doppelbindung liefert jedes Kohlenstoff-Atom zwei Elektronen. Diese insgesamt vier Elektronen bilden als zwei Elektronen-Paare die Doppelbindung.

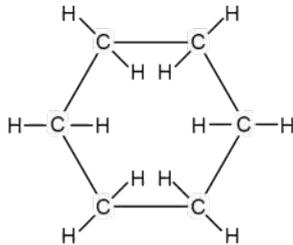
MERKSATZ

Kohlenwasserstoffe mit einer Doppelbindung werden als Alkene oder Olefine bezeichnet. Sie haben die allgemeine Formel C_nH_{2n}.

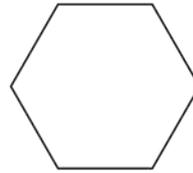
Die Mehrfachbindung bietet ein Art Angriffspunkt für andere Moleküle oder Atome mit leicht anbindbaren Elektronen – beispielsweise Sauerstoff. Daher sind die ungesättigten Verbindungen deutlich reaktionsfreudiger und somit auch instabiler als die gesättigten Verbindungen.

Cyclische Kohlenwasserstoffe

Eine Variation der Alkane sind die Cyclo-Alkane. Hier bilden die gesättigten Kohlenwasserstoffe eine Ring-Struktur. Je größer die Molekül-Strukturen, desto schwieriger wird die ausführliche grafische Darstellung. Daher werden oft als vereinfachte Darstellung sowohl die Kohlenstoff- als auch die Wasserstoff-Atome weggelassen und nur der Ring als Sechseck gezeichnet:



C_6H_{12} Cyclohexan

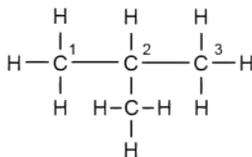


Cyclohexan
vereinfachte Darstellung

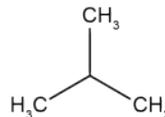
Beide Darstellungen sind ohne die tatsächliche Biegungswinkel der Bindungen angegeben. Durch die leicht gewinkelten Bindungen liegen die Atome nicht in einer Ebene, sondern in einer Art gefaltetem Ring.

Iso-Verbindungen

Neben linearen oder cyclischen (ringförmigen) Struktur können Kohlenwasserstoffe auch Iso-Strukturen bilden. Darunter versteht man verzweigte Strukturen von Kohlenwasserstoffketten. Ein Beispiel hierfür ist Iso-Butan:



C_4H_{10} Iso-Butan
(2-Methylpropan)

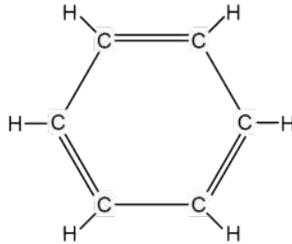
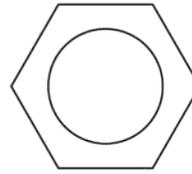


Iso-Butan
vereinfachte Darstellung

Chemisch korrekt wird das Iso-Butan als 2-Methylpropan bezeichnet. Die lineare Kohlenstoffkette besteht aus einem Propan, an dessen 2. Kohlenstoff-Atom eine Methylgruppe verzweigt. Die Bezeichnung «Methyl» ist abgeleitet von dem einfach Alkan Methan (ein Kohlenstoff-Atom). Eine verzweigte Gruppe mit einem Seitenarm aus zwei Kohlenstoff-Atomen wäre eine Ethyl-Gruppe – entsprechend abgeleitet von Ethan.

Aromatische Kohlenwasserstoffe

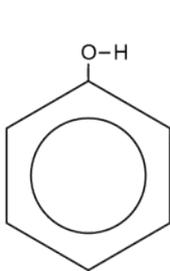
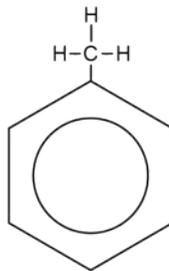
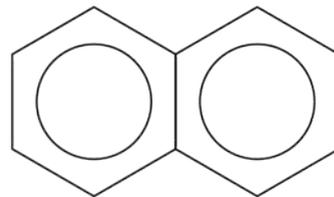
Neben den bereits erwähnten Strukturen und Bindungen können Kohlenwasserstoffe noch eine weitere Molekülform annehmen. In dieser Form bilden sich ringförmige Strukturen, bei denen sich die Bindungs-Elektronen über die Ring-Struktur verteilen, diese Ringe nennt man Benzol-Ringe. Benzol ist ein Ring aus sechs Kohlenstoff-Atomen und sechs Wasserstoff-Atomen (C_6H_6). Über die genaue Struktur hat sich die Wissenschaft sehr lange gestritten:


 C_6H_6 Benzol

 C_6H_6 Benzol
vereinfachte Darstellung

Aufgrund der Summenformel war klar, dass es sich um eine ringförmige Struktur mit Doppelbindungen handeln muss. Daher wird häufig die strukturelle Darstellung mit den drei Doppelbindungen gewählt.

Allerdings reagiert Benzol nicht wie typische ungesättigte Verbindungen. Dies liegt daran, dass die Bindungselektronen nicht an die einzelnen Kohlenstoffatome gebunden sind. Dies wird in der vereinfachten Darstellung durch den Ring in dem Sechseck dargestellt.

Der Name Aromaten kommt von dem aromatischen Geruch vieler Vertreter dieser Verbindungsgruppe. Weitere Vertreter der Aromaten sind:


 C_6H_5OH Benzol

 C_7H_8OH Toluol

 $C_{10}H_8$ Naphthalin

Bedingung für einen Aromaten ist, dass die Bindungselektronen der Kohlenstoff-Atome delokalisiert (verteilt) sind. Neben den Beispielen mit sechs Kohlenstoff-Atomen gibt es auch Aromaten mit fünf Kohlenstoff-Atomen oder auch Kombinationen mit Stickstoff-Atomen.

1.2.4 Funktionelle Gruppen

Die Eigenschaften der Kohlenwasserstoffe können durch Hinzufügen weiterer Gruppen beeinflusst werden. Da diese Gruppen das Reaktionsverhalten des Moleküls verändern, werden sie auch als funktionelle Gruppen bezeichnet.

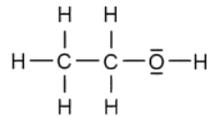
Eine funktionelle Gruppe ist immer eine zusätzliche Gruppe in einem Molekül. Sie kann für sich allein nicht existieren.

Tabelle 1.1 zeigt Beispiele für funktionelle Gruppen. Das «restliche Molekül» wird mit «R» als «Rest» abgekürzt.

Tabelle 1.1 Funktionelle Gruppen

Funktionelle Gruppe	Kurzform	Name der Gruppe
$\text{R}-\overset{\ominus}{\text{O}}-\text{H}$	-ROH	Alkohol, Hydroxyl
$\begin{array}{c} \overset{\ominus}{\text{O}} \\ \parallel \\ \text{R}-\text{C}-\text{H} \end{array}$	-RCHO	Aldehyd
$\begin{array}{c} \overset{\ominus}{\text{O}} \\ \parallel \\ \text{R}-\text{C}-\overset{\ominus}{\text{O}}-\text{H} \end{array}$	-RCOOH	(Carbon-)Säure
$\begin{array}{c} \text{H} \\ \\ \text{R}-\text{N} \\ \\ \text{H} \end{array}$	-RNH ₂	Amin
$\text{R}-\bar{\text{N}}=\text{C}=\overset{\ominus}{\text{O}}$	-RNCO	Isocyanat

R kann beispielsweise auf Ethan basieren. Dieser Rest wird dann als Ethan- oder Ethyl- bezeichnet. In Kombination mit der Alkoholgruppe ergibt sich somit der Ethylalkohol (Ethanol):



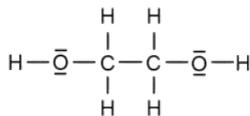
Mehrfunktionalität

Ein Molekül kann mehrere funktionelle Gruppen gleichzeitig aufweisen. Diese funktionellen Gruppen können unterschiedlich sein – es kann aber auch mehrfach die gleiche funktionelle Gruppe vorhanden sein.

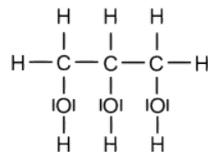
Als Bezeichnung für eine gleiche, mehrfach vorhandene Gruppe werden Vorsilben verwendet:

- Di: zwei
- Tri: drei
- Tetra: vier
- Penta: fünf
- Poly: viele

Beispiele für Alkohole:



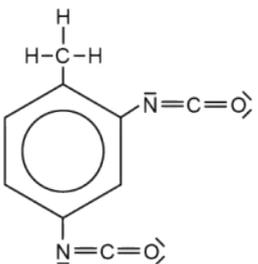
Ethandiol (Glycol)



Propantriol (Glycerin)

Die Benennung bei den anderen funktionellen Gruppen und dem Rest folgt dem gleichen Schema und ist in Tabelle 1.2 zusammengestellt.

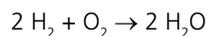
Tabelle 1.2 Benennung von funktionellen Gruppen

Substanz	Rest	Funktionelle Gruppe	Name
$\begin{array}{c} \text{H} \quad \overset{\text{O}}{\parallel} \\ \quad \quad \\ \text{H}-\text{C}-\text{C}-\text{O}-\text{H} \\ \\ \text{H} \end{array}$	-Ethan	Säure	Ethansäure/ Essigsäure
$\begin{array}{c} \overset{\text{O}}{\parallel} \quad \left[\begin{array}{c} \text{H} \\ \\ \text{H} \end{array} \right] \quad \overset{\text{O}}{\parallel} \\ \quad \quad \quad \quad \\ \text{H}-\text{O}-\text{C}-\text{C}-\text{C}-\text{C}-\text{O}-\text{H} \\ \quad \quad \\ \quad \quad \text{H} \end{array} \quad \text{H} \end{array}$	-Hexan	Säure (2x)	Hexandisäure/ Adipinsäure
$\begin{array}{c} \text{H} \quad \text{H} \quad \text{H} \\ \quad \quad \\ \text{H}-\text{C}-\text{C}-\text{N}-\text{H} \\ \quad \quad \\ \text{H} \quad \text{H} \quad \text{H} \end{array}$	-Ethan	Amin	Ethanamin/ Ethylamin
$\begin{array}{c} \text{H} \quad \left[\begin{array}{c} \text{H} \\ \\ \text{H} \end{array} \right] \quad \text{H} \\ \quad \quad \\ \text{H}-\text{N}-\text{C}-\text{N}-\text{H} \\ \quad \quad \\ \text{H} \quad \left[\begin{array}{c} \text{H} \\ \\ \text{H} \end{array} \right] \quad \text{H} \end{array} \quad \text{H} \end{array}$	-Hexan	Amin (2x)	Hexandiamin/ Hexamethyldiamin
	-Toluol	Isocyanat (2x)	Toluoldiisocyanat/ TDI

Achtung: Bei der Benennung des Restes zählen die Kohlenstoff-Atome der Säure mit.

1.2.5 Chemische Reaktionen

Moleküle und Elemente sind in der Lage, miteinander zu reagieren. Ein einfaches Beispiel für die Reaktion zweier Elemente ist die Knallgas-Reaktion. Sauerstoff- und Wasserstoffgas werden in einen Luftballon geleitet. Die chemische Reaktion wird unter Einleitung von Energie (z. B. durch die Flamme eines Feuerzeuges) gestartet. Das bei der Explosion entstehende Produkt ist Wasser (H_2O). Die chemische Reaktion kann mit folgender Reaktionsgleichung beschrieben werden:

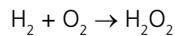


Bei der chemischen Reaktionsgleichung muss die Anzahl der Atome auf der linken Seite (Ausgangsstoffe) exakt mit der Anzahl der Atome auf der rechten Seite (Produkte) übereinstimmen.

Chemische Reaktionen können auch durch andere Arten der Energie-Einwirkung gestartet werden, beispielsweise durch Wärme, Elektrizität, Druck oder Licht.

Die Reaktionsgeschwindigkeit kann sehr unterschiedlich sein und hängt von zahlreichen Faktoren wie der Reaktivität der Ausgangsstoffe oder den Umgebungsbedingungen (Temperatur, Druck, Luftfeuchtigkeit etc.) ab. Während die Knallgasreaktion extrem schnell abläuft, dauern die chemischen Reaktionen bei Kunststoffmolekülen oft mehrere Stunden.

Durch die chemische Reaktion entstehen neue Moleküle. Die entstehenden Moleküle können wiederum selbst mit den Ausgangsmolekülen reagieren. Chemische Reaktionen sind daher in der Regel relativ komplex. Sie verlaufen oft nicht nach einem einzigen Reaktionsweg ab, sondern es erfolgen unterschiedliche Reaktionen parallel. Diese Reaktionen werden als Nebenreaktionen bezeichnet. So reagiert bei der bereits erwähnten Knallgas-Reaktion ein kleiner Teil der Ausgangsstoffe auf einem anderen Weg:



In diesem Fall entsteht als Nebenprodukt Wasserstoffperoxid (H_2O_2).

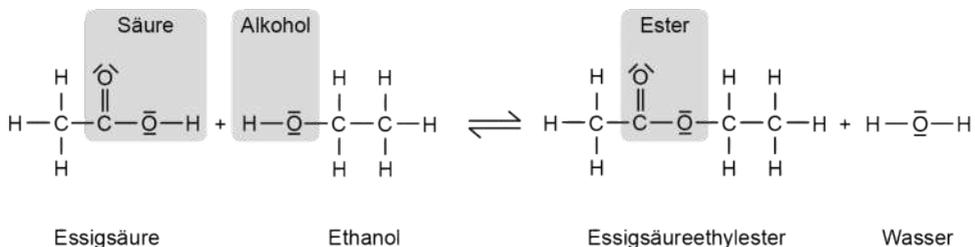
Meist verlaufen Reaktionen auch nicht vollständig ab. In der Chemie werden daher in Reaktionsgleichungen nicht nur Pfeile, sondern auch sogenannte Gleichgewichtspfeile verwendet:



Die Kombination von unterschiedlichen funktionellen Gruppen miteinander führt zu neuen Verbindungen.

Ester (Säure + Alkohol)

Säuren reagieren mit Alkoholen unter Wasserabspaltung zu Estern, ein Beispiel ist:

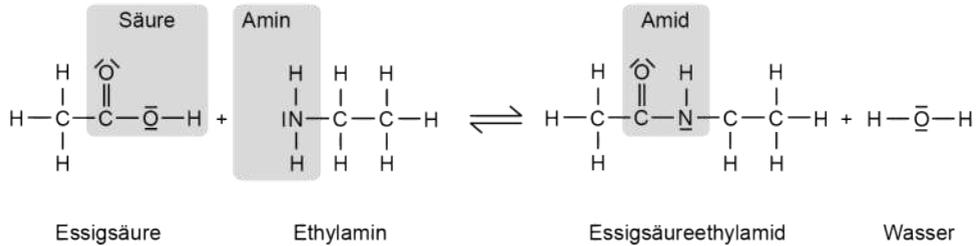


Verbindungs-Reaktionen in der organischen Chemie, bei denen kleine Moleküle wie z. B. Wasser entstehen, werden als Kondensationsreaktionen bezeichnet.

Die Reaktion kann auch in die umgekehrte Richtung laufen. Je nach Umgebungsbedingung kann sich der Ester durch Wasser in die beiden Ausgangskomponenten zurückbilden. Diesen Vorgang nennt man Hydrolyse – Spaltung unter Wassereinfluss.

Amid (Säure + Amin)

Reagiert die Säure mit einem Amin, entsteht ein Amid, beispielsweise:

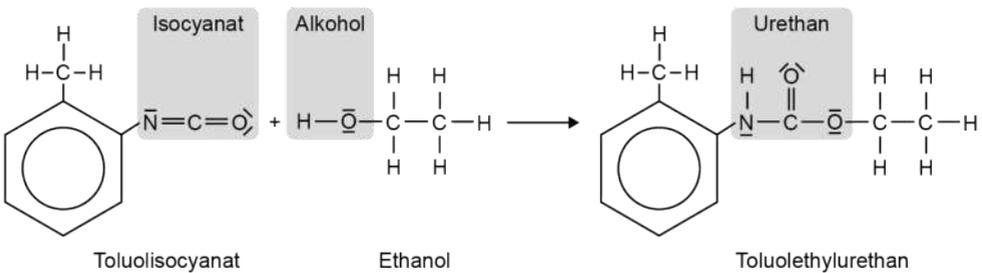


Auch hier handelt es sich um eine Kondensation, da Wasser als Reaktionsprodukt entsteht.

Wie bei einem Ester kann es auch bei einem Amid zur Rückreaktion unter Wassereinfluss (Hydrolyse) kommen.

Urethan (Isocyanat + Alkohol)

Bei der Urethan-Bildung handelt es sich um eine Additionsreaktion, ein Beispiel ist:



Beide Ausgangsstoffe addieren sich einfach, ohne dass ein weiteres Molekül entsteht. Aufgrund der hohen Reaktivität des Isocyanats findet praktisch keine Rückreaktion statt. Daher wird die Reaktionsgleichung in diesem Fall mit einem direkten Pfeil dargestellt.

Eine Hydrolyse von Urethanen ist zwar chemisch möglich, jedoch entstehen dabei teilweise andere Moleküle als die ursprünglichen Ausgangsprodukte.

1.2.6 Vom Rohöl zum Monomer

Fast alle organischen Stoffe, die synthetisch auf gebaut werden, haben als Rohstoffbasis Erdöl, Erdgas oder Kohle. Davon hat das Erdöl die größte Bedeutung. Erdöl (Rohöl) enthält mehr als 1000 verschiedene Kohlenwasserstoffverbindungen. Zur Weiterverarbeitung zu synthetischen Produkten muss Erdöl erst aufbereitet werden.

Fraktionierte Destillation

Erdöl wird im Röhrenofen auf etwa 400 °C erhitzt und einem gekühlten Fraktionierturm zugeleitet. Der größte Teil des Erdöls verdampft und wandert durch die vielen Etagen des Fraktionierturms. Beim Abkühlen des Erdöldampfs kondensieren in den einzelnen Etagen bestimmte Erdölanteile und werden seitlich abgeführt. Damit der Erdöldampf langsam aufsteigt, sind die Etagendurchlässe mit Glocken abgedeckt (Bild 1.2).

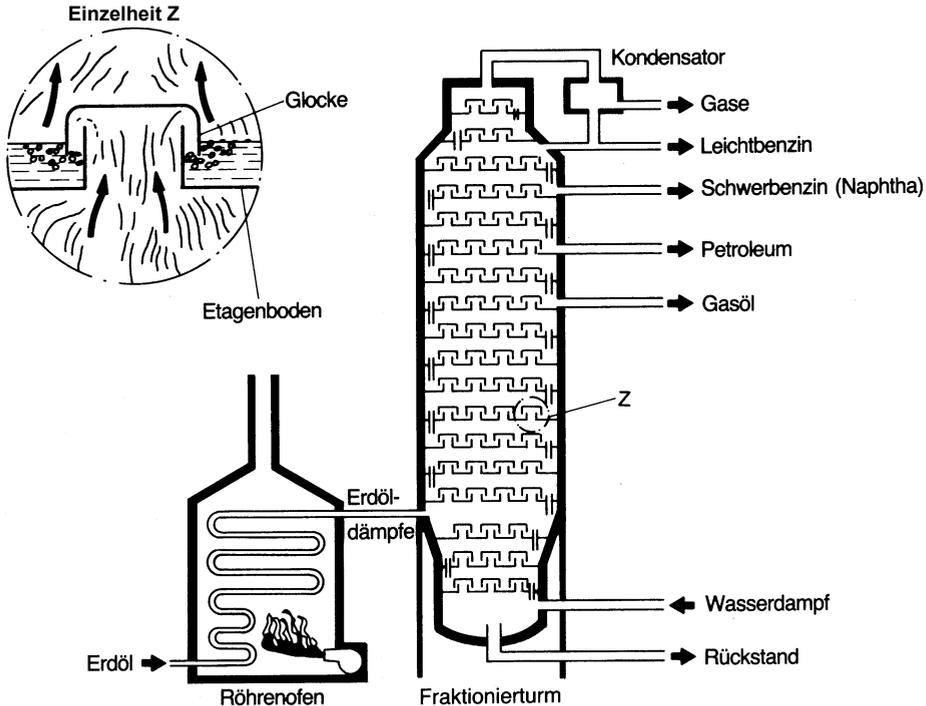


Bild 1.2 Destillation von Erdöl

Zusammensetzung der Fraktionen

Die bei der Destillation erhaltenen Fraktionen sind Kohlenwasserstoffe, die sich in ihrem Siedepunkt und damit ihren Molekülgrößen unterscheiden (Tabelle 1.3).

Tabelle 1.3 Bei der Destillation erhaltene Fraktionen

Fraktion	Siedepunkt °C	Kohlenwasserstoffe
Gase	bis 30 °C	von C ₁ bis C ₄
Leichtbenzin	bis 100 °C	von C ₅ bis C ₇
Schwerbenzin	bis 200 °C	von C ₇ bis C ₁₀
Petroleum	bis 260 °C	von C ₁₁ bis C ₁₄
Gasöl	bis 360 °C	von C ₁₆ bis C ₁₉

Anteile der Fraktionen

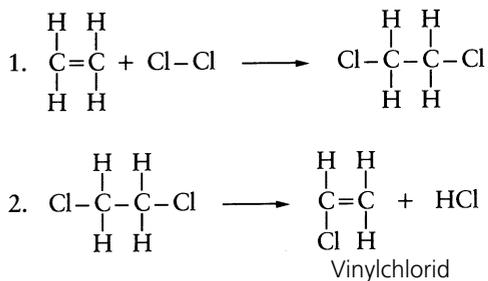
Die prozentualen Anteile sind je nach Herkunftsland verschieden. Im Allgemeinen wächst mit steigendem Siedepunkt der prozentuale Anteil der Fraktionen.

Aus einem Oktanmolekül entstehen drei Ethylenmoleküle und ein Ethanmolekül. In der Praxis wird aber ein vielfältigeres Gemisch verschiedener Gase erhalten. Man kann die Ausbeute zugunsten einer bestimmten Verbindung durch geeignete Crackbedingungen erhöhen. Das Gasgemisch wird zur Abtrennung von reinem Ethylen verflüssigt und anschließend fraktioniert destilliert. Ethylen ist ein sehr wichtiger Basisrohstoff für viele organische Produkte. Aus Ethylen kann man direkt durch eine Reaktion einen Kunststoff, aber auch weitere Zwischenprodukte herstellen.

Beispiele von Umwandlungsreaktionen

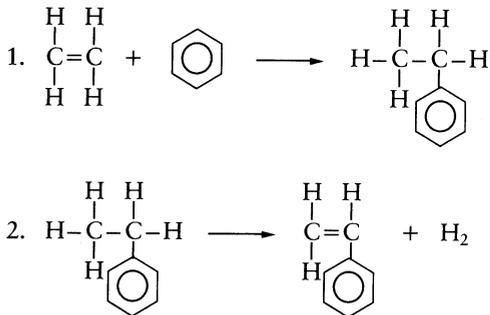
Vinylchlorid

Über zwei chemische Reaktionsschritte kann man aus Ethylen und Chlor Vinylchlorid herstellen.



Styrol

Aus Ethylen und Benzol entsteht über zwei Reaktionsschritte Ethylenbenzol (Styrol).



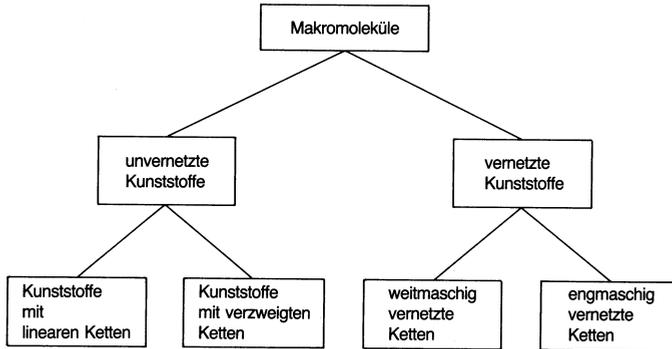
DEFINITION

Moleküle, die zur Kunststoffherstellung eingesetzt werden, bezeichnet man als Monomere. Die genannten Moleküle Ethylen, Vinylchlorid und Styrol sind Monomere, aus denen Kunststoffe aufgebaut werden können.



1.2.7 Polyreaktionen

Aus vielen kleinen Bausteinen (Monomeren) werden über Polyreaktionen Großmoleküle oder Polymere (Makromoleküle) aufgebaut.



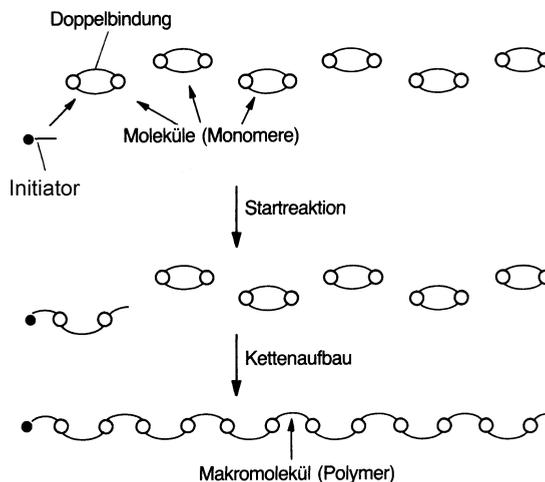
Polymerisation

Bei der Polymerisation werden viele kleine Moleküle gleicher oder ähnlicher Bauart (Monomere) zu einem Makromolekül zusammengebaut. Die Moleküle müssen für die Reaktion Doppelbindungen besitzen. Wärme und Katalysatoren spalten die Doppelbindung, so dass sich an jedes Molekül über freie Bindearme weitere Moleküle anbinden lassen.

Die Polymerisation läuft in drei Stufen ab:

- Startreaktion,
- Wachstumsreaktion,
- Abbruchreaktion.

Der Start wird durch den Initiator ausgelöst. Dann erfolgt das Wachstum zu einem Makromolekül. Am Ende der Kette wird die Absättigung der freien Valenz z. B. durch Ausbildung einer Doppelbindung erreicht. Nachfolgend ein Modellbeispiel für die Polymerisation:



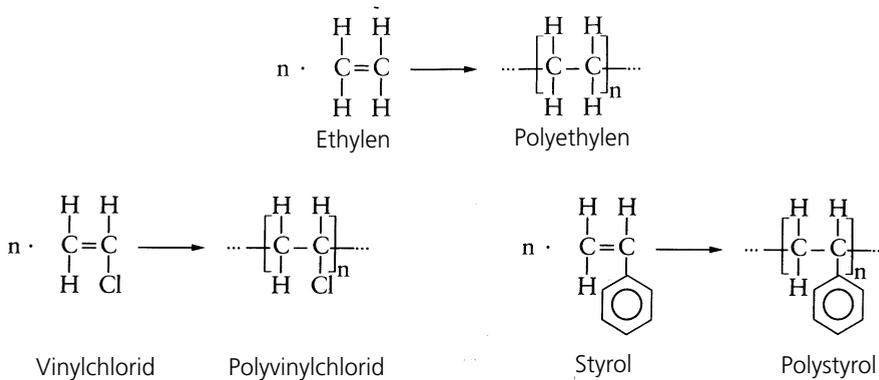
Aus vielen (n) Monomeren wird ein Polymer gebaut



Das «n» hinter der eckigen Klammer gibt die Anzahl der Monomere an, die in die Molekülkette eingebaut worden sind, und wird als Polymerisationsgrad bezeichnet. Bei makromolekularen Stoffen ist der Polymerisationsgrad immer größer als 1000.

Polyethylen, Polyvinylchlorid, Polystyrol

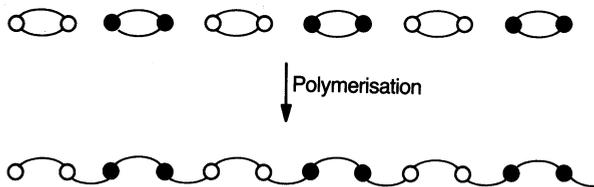
Ersetzt man im Beispiel die Kugeln durch Atomgruppen, erhält man die Polymerisationsreaktionen für Polyethylen (PE), Polyvinylchlorid (PVC) und Polystyrol (PS).



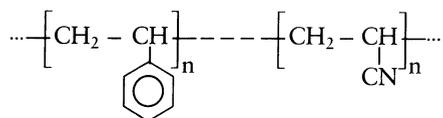
Copolymere

Neben den drei wichtigsten Kunststoffen PE, PVC, PS gibt es noch weitere Polymerisate (Kapitel 2). Außerdem lassen sich auch zwei oder drei verschiedenartige Monomere in eine Kette polymerisieren. Diese Produkte heißen Copolymere oder Terpolymere.

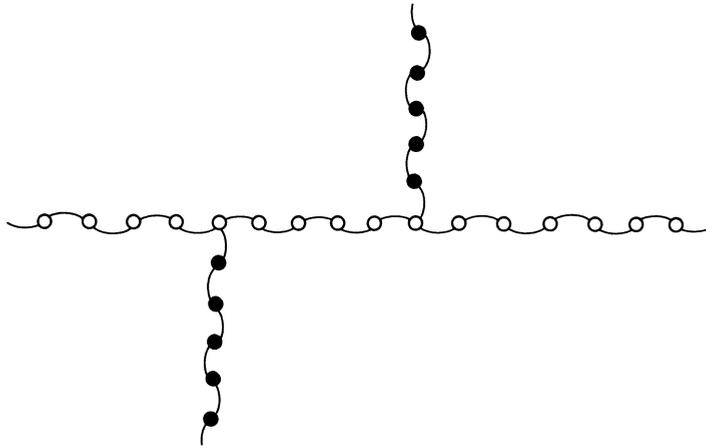
Beispiel



Ein Copolymerisat ist z. B. Styrol-Acrylnitril



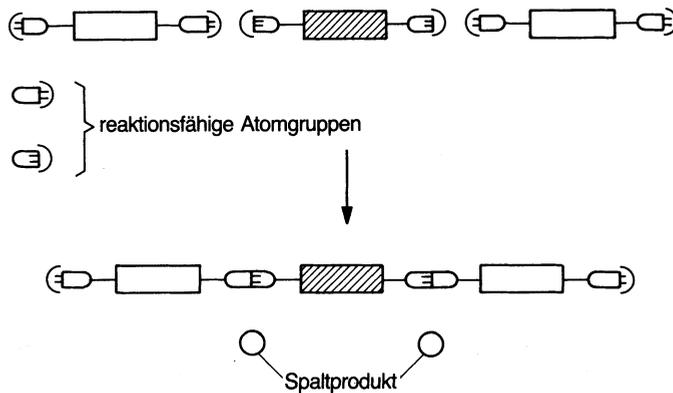
Auch das Aufpfropfen von fertigen Polymerketten auf eine andere Polymerkette ist möglich (Pfpfropcopolymerisate).



Polykondensation

Bei der Polykondensation werden in der Regel zwei verschiedene Arten von Molekülbausteinen zusammengebaut. Diese Moleküle besitzen an ihren Enden je eine reaktionsfähige Atomgruppe. Es ist aber auch möglich, gleiche Molekülbausteine mit zwei verschiedenartigen Atomgruppen zu Makromolekülen zusammenzubauen. Bei der Reaktion wird immer ein Spaltprodukt (meist Wasser) ausgeschieden.

Modellbeispiel



Polyamid

Überträgt man das Modellbeispiel auf die chemischen Verbindungen Diamin und Disäure, erhält man Polyamide (PA).

