

HANSER



Leseprobe

zu

„Kunststoff-Wissen für Einsteiger“

von Georg Abts

Print-ISBN: 978-3-446-46291-5

E-Book-ISBN: 978-3-446-46525-1

Weitere Informationen und Bestellungen unter
<http://www.hanser-fachbuch.de/978-3-446-46291-5>
sowie im Buchhandel

© Carl Hanser Verlag, München

Der Autor

Dipl.-Ing. Georg Abts arbeitete nach seinem Studium 20 Jahre in der damaligen Abteilung Anwendungstechnik des Geschäftsbereichs Kautschuk der Bayer AG, Leverkusen. Danach wechselte er in den Geschäftsbereich Polycarbonates der Covestro AG (ehemals Bayer MaterialScience AG). Er ist Mitglied des CAMPUS-Arbeitskreises und blickt heute auf eine über 30-jährige Erfahrung mit polymeren Werkstoffen zurück.

Er ist darüber hinaus Autor des Buches: Einführung in die Kautschuktechnologie, Carl Hanser Verlag, 2019, 978-3-446-45461-3

Vorwort zur 4. Auflage

Synthetische Polymerwerkstoffe sind im Vergleich zu Metallen und Keramik eine relativ junge Werkstoffklasse, die mittlerweile aber einen Spaltenplatz unter den modernen Werkstoffen erobert hat. Kunststoffe besetzen nicht nur die Lücke zwischen natürlichen Werkstoffen wie Holz oder Keramiken einerseits und hochfesten metallischen Werkstoffen andererseits. Sie haben sich in vielen Fällen auch als günstige Alternativen für diese Materialien durchgesetzt.

Ein wesentlicher Vorteil von Kunststoffen ist ihre geringe Dichte. Verpackungen aus Kunststoff sind leichter und bruchfester als Glas. Gebäude werden durch Kunststoffe vor Wärmeverlusten geschützt, Fahrzeuge werden leichter, elektrische Geräte sicherer. Zudem erfordert die Herstellung von Kunststoffen einen geringeren Bedarf an Primärenergie als die Produktion von Metallen oder keramischen Werkstoffen. Damit tragen Kunststoffe auch zu einem verminderten Ausstoß an Kohlendioxid bei. Weiterhin ermöglichen Kunststoffe eine einfache und effiziente Herstellung geometrisch komplexer Produkte mit weitaus mehr Gestaltungsfreiheit als Metalle oder keramische Werkstoffe.

Somit haben Kunststoffe sich aus der ursprünglich zugesetzten Rolle als Ersatzprodukte für edle Naturstoffe wie Elfenbein oder für knapper werdende Rohstoffe wie Naturkautschuk längst zu einer eigenständigen Werkstoffklasse weiterentwickelt. Durch immer weiter steigende Anforderungen und neue Anwendungsgebiete hat sich auch das Spektrum der verfügbaren Kunststoffe erheblich erweitert. Kunststoffe bieten oft maßgeschneiderte Lösungen für moderne technische Herausforderungen.

→ Daher sind Kunststoffe für viele Einsatzgebiete unverzichtbar.

Waren Kunststoffe vor einigen Jahren durchweg mit einem positiven Image belegt, hat sich dieses Bild aufgrund der zunehmenden Wahrnehmung der Bevölkerung für die Belastung der Umwelt mit Kunststoffabfällen inzwischen gewandelt. Die durch Kunststoffabfälle verursachte Vermüllung unseres Planeten, insbesondere der Meere (Marine-Litter), stellt vermutlich eine der größten Herausforderungen

des 21. Jahrhunderts dar. Zwar stammt der überwiegende Anteil des in die Meere eingetragenen Kunststoffmülls aus Ländern ohne ausgeprägtes Abfallmanagement, es ist jedoch zu einfach, mit dem Finger auf die Länder zu zeigen, die bis vor kurzem bereitwillig einen Teil des Kunststoffabfalls der Industriestaaten importiert haben, oder die nun die Schwelle zur Industrienation überschritten haben, was mit einem erhöhten Bedarf an Konsumgütern und individueller Mobilität einher geht.

Allerdings lassen auch die in den Industriestaaten etablierten Systeme zur Verwertung von Abfällen keine sortenreine Trennung von Kunststoffen zu. Selbst dann stellt sich noch die Problematik des Recyclings, da auch sortenreine Kunststoffe noch vielfältige Variationen ihrer Zusammensetzung aufweisen. Zudem führt die wiederholte thermische Behandlung zu einem immer weiter fortschreitenden Abbau der Polymerketten und damit zum Verlust mechanischer und thermischer Eigenschaften. Kunststoffmüll lässt sich aber schon dadurch reduzieren, indem bereits vor der geplanten Verwendung über den späteren Verbleib in der Umwelt nachgedacht wird. Beispielsweise ist eine übertriebene Verpackung preiswerter Konsumgüter ebenso vermeidbar wie die Verwendung von winzigen Kunststoffteilchen (Mikroplastik) als Reibkörper in Kosmetikartikeln.

Allerdings ist ein vollständiger Ersatz von Kunststoffen auf Basis fossiler Rohstoffe wie Erdöl oder Erdgas schlichtweg nicht realisierbar. Der Weg zurück zu Metallen, Glas oder keramischen Werkstoffen ist aufgrund des deutlich höheren Energieverbrauchs bei der Herstellung und beim Transport nicht gangbar. Auch Papier, selbst mit sehr hohem Anteil Altpapier, zeigt eine schlechtere Ökobilanz als Kunststoff. Zwar lassen sich Kunststoffe für Verpackungen, die das größte Anwendungsgebiet ausmachen, teilweise durch Kunststoffe auf Basis nachwachsender Rohstoffe ersetzen. Diese wiederum beanspruchen aber ebenfalls Anbauflächen und Wasser und stehen damit in Konkurrenz zur Produktion von Lebens- und Futtermitteln für die wachsende Weltbevölkerung und deren Nutztiere. Zudem lassen sich hochwertige Kunststoffe allein auf diese Weise nicht gewinnen. Auf der anderen Seite erfüllen kompostierbare Produkte bei weitem nicht die Anforderungen anspruchsvoller technischer Produkte hinsichtlich mechanischer und insbesondere thermischer Beständigkeit sowie der geforderten Langlebigkeit. Außerdem verführen sogenannte „Biokunststoffe“ wiederum zu einem Anstieg von Einwegartikeln, die womöglich achtlos weggeworfen werden.

Ein absoluter Verzicht auf Kunststoffe würde unausweichlich mit einem Verzicht auf individuelle Mobilität, Verzicht auf moderne Konsumgüter, Verzicht auf Lebensqualität, aber dafür mit deutlich ansteigenden Emissionen einhergehen. Gleichwohl bleibt festzustellen, dass es Anwendungen gibt, bei denen der Kunststoffanteil reduziert werden kann, oder der Einsatz recycelter Kunststoffe möglich ist.

Dieses Buch soll dazu beitragen, die komplexe Vielfalt der Kunststoffe besser zu verstehen und auf ihre positiven Eigenschaften aufmerksam zu machen.

Nach einem historischen Rückblick auf die Entwicklung der Werkstoffe werden die verschiedenen Arten synthetischer Werkstoffe von den traditionellen Werkstoffen auf metallischer und keramischer Basis abgegrenzt und ihre Vor- und Nachteile erläutert. Aufgrund ihrer wirtschaftlichen Bedeutung liegt der Schwerpunkt auf den Thermoplasten, deren wichtigste Vertreter mit einem kurzen Eigenschaftsprofil vorgestellt werden. Daneben werden aber auch die Werkstoffklassen der Elastomere und Duroplaste charakterisiert, um das Spektrum der synthetischen Werkstoffe vollständig aufzuzeigen. (Zur detaillierteren Beschreibung der Elastomere sei auf mein Buch „Einführung in die Kautschuktechnologie“ verwiesen).

Zudem werden auch Verbundwerkstoffe beschrieben, die insbesondere im Leichtbau eine immer größere Bedeutung gewinnen. Ein weiteres Kapitel befasst sich mit den am meisten verbreiteten Verarbeitungsverfahren, dieses enthält auch einen kurzen Abriss über die Möglichkeiten der additiven Fertigung. Einige Prüfverfahren und Werkstoffkenngrößen werden vorgestellt, um einen Bezug zu den in den Werkstoffbeschreibungen der Hersteller gegebenen Daten zu bieten. Die noch relativ neuen Biokunststoffe werden vorgestellt und die Thematik des Kunststoffmülls sowie die Problematik des Recyclings ausführlich besprochen.

→ Insofern hoffe ich, dass dieses Buch eine möglichst neutrale Grundlage für eine sachliche Diskussion bieten kann.

Ich bedanke mich bei allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Hanser Verlags, insbesondere bei Ulrike Wittmann für ihre Unterstützung als Lektorin sowie Jörg Strohbach für die Umsetzung und Produktion dieses Buches.

Georg Abts, April 2020

Inhaltsverzeichnis

Der Autor	VII
Vorwort zur 4. Auflage	IX
Inhaltsverzeichnis	XI
1 Natürliche und synthetische Werkstoffe	1
1.1 Definitionen	1
1.2 Historische Entwicklung	4
1.3 Abgrenzung der Kunststoffe von Metallen und keramischen Werkstoffen	26
1.3.1 Aufbau	27
1.3.2 Dichte	29
1.3.3 Mechanische Eigenschaften	30
1.3.3.1 Allgemeine Betrachtungen	30
1.3.3.2 Metalle	32
1.3.3.3 Keramische Werkstoffe	35
1.3.3.4 Spezifisches Verhalten von Thermoplasten	36
1.3.3.5 Spezifisches Verhalten von Elastomeren	40
1.3.3.6 Spezifisches Verhalten von Duroplasten	41
1.3.3.7 Betrachtung weiterer mechanischer Kennwerte	41
1.3.3.8 Verhalten unter dynamischer Belastung	43
1.3.4 Gebrauchstemperatur	45
1.3.5 Wärmeausdehnung und Wärmeleitfähigkeit	47
1.3.6 Elektrische Leitfähigkeit	48
1.3.7 Optische Eigenschaften	49
1.3.8 Akustische Eigenschaften	50
1.3.9 Verhalten gegenüber Chemikalien und Umwelteinflüssen	51
1.3.10 Prinzipielle Unterschiede bei der Verarbeitung	54
1.3.11 Zusammenfassender Vergleich	55
1.4 Wirtschaftliche Bedeutung der Kunststoffe	58

2 Polymere Werkstoffe	67
2.1 Chemische Grundlagen	67
2.2 Grundlagen polymerer Werkstoffe	74
2.3 Polymerisation, Polyaddition, Polykondensation	79
2.4 Arten polymerer Werkstoffe	80
2.4.1 Klassifizierung	80
2.4.2 Temperaturabhängige Charakteristik	83
2.4.3 Thermoplaste	87
2.4.4 Elastomere	90
2.4.5 Thermoplastische Elastomere	97
2.4.6 Duroplaste	98
2.4.7 Faserverstärkte Kunststoff-Verbundwerkstoffe (Composites)	101
3 Thermoplaste	109
3.1 Herstellung	109
3.2 Einteilung	110
3.3 Standardkunststoffe: Eigenschaften, Charakteristik, Anwendungen	112
3.3.1 Polyethylen (PE)	112
3.3.2 Polypropylen (PP)	114
3.3.3 Polyvinylchlorid (PVC)	115
3.3.4 Polystyrol (PS)	119
3.4 Technische Thermoplaste	120
3.4.1 Styrol-Acrylnitril-Kunststoff (SAN)	120
3.4.2 Acrylnitril-Butadien-Styrol-Kunststoff (ABS)	121
3.4.3 Acrylnitril-Styrol-Acrylat-Kunststoff (ASA)	122
3.4.4 Polyamide (PA)	122
3.4.5 Polymethylmethacrylat (PMMA)	126
3.4.6 Polyethylenterephthalat (PET)	127
3.4.7 Polybutylenterephthalat (PBT)	129
3.4.8 Polycarbonat (PC)	129
3.4.9 Polyoxymethylen (POM)	132
3.4.10 Polyphenylenether (PPE)	132
3.4.11 Polymerblends	133
3.5 Hochleistungskunststoffe	134
3.5.1 Fluorkunststoffe	134
3.5.2 Polyarylsulfone (PSU), Polyethersulfone (PES), Polyphenylensulfone (PPSU)	135
3.5.3 Polyphenylensulfid (PPS)	136
3.5.4 Polyaryletherketone (PAEK)	136

3.5.5 Polyimide (PI)	137
3.5.6 Selbstverstärkende teilkristalline Polymere (LCP)	138
3.6 Elektrisch leitfähige Polymere	139
3.7 Thermoplastische Elastomere (TPE)	140
3.7.1 Übersicht und Nomenklatur	140
3.7.2 Spezifisches Eigenschaftsprofil	144
3.7.2.1 Thermoplastische Elastomere auf Basis von Polyetheramiden (TPA)	144
3.7.2.2 Thermoplastische Elastomere auf Basis Polyetherester (TPC)	145
3.7.2.3 Unvernetzte (TPO) und vernetzte (TPV) thermoplastische Elastomere auf Olefinbasis	145
3.7.2.4 Thermoplastische Elastomere auf Styrolbasis (TPS)	147
3.7.2.5 Thermoplastische Polyurethan-Elastomere (TPU)	148
3.8 Biopolymere/Biokunststoffe	149
4 Kunststoffadditive	161
4.1 Füllstoffe	161
4.2 Faserwerkstoffe	162
4.3 Weichmacher	164
4.4 Flammschutzmittel	164
4.5 Stabilisatoren	165
4.6 Farbmittel	167
4.7 Weitere Additive	168
5 Die Verarbeitung von Thermoplasten	171
5.1 Aufbereiten	172
5.2 Urformen	173
5.2.1 Spritzgießen	173
5.2.2 Extrusion	179
5.2.3 Blasformen	182
5.2.4 Kalandrieren	184
5.2.5 Rotationsformen (Rotomolding)	185
5.2.6 Wirbelsintern	186
5.2.7 Schäumen	187
5.2.8 Tempern	188
5.2.9 Additive Fertigung	188
5.3 Umformen	189

5.4	Fügen	191
5.4.1	Schweißen	192
5.4.2	Kleben	194
5.4.3	Nieten	195
5.4.4	Schrauben	195
5.4.5	Schnappverbindungen	196
5.5	Veredelung	197
6	Kennwerte von Thermoplasten	199
6.1	Rheologische Eigenschaften	200
6.1.1	Schmelzindex (MVR, MFR), ISO 1133	200
6.1.2	Schwindung, ISO 294	200
6.2	Mechanische Eigenschaften	201
6.2.1	Zugversuch, ISO 527	201
6.2.2	Schlag- und Kerbschlagbiegeversuch, ISO 179 (Charpy)/ISO 180 (Izod)	202
6.3	Thermische Kennwerte	202
6.4	Brandverhalten	203
6.5	Elektrische Prüfungen	204
6.6	Sonstige Kennwerte	204
6.6.1	Härte	204
6.6.2	Druckverformungsrest (ISO 815)	205
6.6.3	Dynamische Prüfungen	205
7	Kunststoffe und Umwelt	207
7.1	Aktuelle Situation im Jahr 2019	207
7.2	Recycling von Werkstoffen	215
7.3	Recycling von Metall, Glas, Keramik und Papier	216
7.3.1	Recycling von Stahl	216
7.3.2	Recycling von Aluminium	217
7.3.3	Recycling von Glas	217
7.3.4	Recycling von Keramik	218
7.3.5	Recycling von Papier	219
7.4	Recycling von Kunststoffen	219
7.4.1	Kunststoffabfall in Zahlen und Fakten	219
7.4.2	Generelle Probleme beim Recyceln von Kunststoffen	221
7.4.3	Einteilung und Kennzeichnung von Kunststoffabfällen	225

7.4.4 Verwertung von Kunststoffabfällen	226
7.4.4.1 Produktionsabfälle	226
7.4.4.2 Verarbeitungsabfälle	226
7.4.4.3 Sortenreine Kunststoffabfälle	226
7.4.4.4 Verbundteile aus mehreren Kunststoffen	228
7.4.4.5 Faserverstärkte Kunststoffe	229
7.4.4.6 Elastomere und Duroplaste	229
7.4.4.7 Gemischte Kunststoffabfälle	230
7.4.4.8 Chemisches Recycling	232
7.4.4.9 Zusammenfassung	234
7.5 Fazit	236
8 Übersichtstabellen	243
9 Glossar	261
10 Weiterführende Literatur	277
Index	279

1

Natürliche und synthetische Werkstoffe

Erdgeschichtlich betrachtet, sind synthetische Polymere eine recht junge Werkstoffklasse. Die meisten wurden erstmalig Anfang bis Mitte des zwanzigsten Jahrhunderts hergestellt. Einige Kunststoffe gab es auch schon im auslaufenden neunzehnten Jahrhundert, ohne dass ihre genaue Zusammensetzung jedoch bekannt war. Im Vergleich dazu sind metallische und keramische Werkstoffe bereits seit Jahrtausenden in Gebrauch.

Definiert man Kunststoffe als nicht natürlich vorkommende, künstlich hergestellte Stoffe, muss man aber auch solche Materialien dazu zählen, die durch Umwandlung aus natürlichen Stoffen hergestellt werden. Dann allerdings reicht die Geschichte der Kunststoffe viele tausend Jahre zurück. Bevor näher auf die Geschichte der polymeren Werkstoffe eingegangen wird, sollen daher zuerst natürliche und synthetische Werkstoffe voneinander abgegrenzt werden.

■ 1.1 Definitionen

Nach Brockhaus sind Werkstoffe „alle Materialien mit technisch nutzbaren Eigenschaften (...). Der Zustand eines Werkstoffes wird durch seinen Aufbau und seine Eigenschaften charakterisiert (...). Der Aufbau eines Werkstoffes ergibt sich aus der chemischen Zusammensetzung (...). Entsprechend der technischen Anwendung werden Werkstoffe nach ihren mechanischen (z.B. Zugfestigkeit, Elastizität, Härte), chemisch-physikalischen (z.B. Schmelzpunkt, Dichte, Korrosionsbeständigkeit), Feld- (magnetischen, elektrischen, elektromagnetischen) oder verarbeitungstechnischen Eigenschaften ausgewählt.“

Die Werkstoffe lassen sich in die drei Hauptgruppen Metalle, nichtmetallisch-anorganische Werkstoffe und organische Stoffe unterteilen. Zur Herstellung von Ver-

bundwerkstoffen werden verschiedene Werkstoffe miteinander kombiniert.“ [8]. Eine Einteilung der Werkstoffe nach Zusammensetzung zeigt Bild 1.1.

Natürliche Werkstoffe sind beispielsweise Holz, Pflanzenfasern (Baumwolle, Flachs und Hanf), Metalle, Minerale, Erdöl, Erdgas, Kohle, Asphalt, Harze und Naturkautschuk. Metalle zählen aufgrund ihres Vorkommens (fast ausschließlich Erze) auch zu den Mineralien. Als mineralische Werkstoffe im engeren Sinne sollen hier natürlich vorkommende anorganische (meist silikatische) Verbindungen oder deren chemische Umwandlungsprodukte betrachtet werden. Für ihre weitere Verwendung werden natürliche Werkstoffe mechanisch oder chemisch-thermisch umgewandelt, wobei letzteres oft mit einer deutlichen Änderung von Eigenschaften einhergeht.

Ausgehend von den bekannten Eigenschaften der Rohmaterialien lassen sich die entsprechenden Anwendungsgebiete relativ leicht erschließen. Die aus Eisenerzen gewonnenen Stähle sind wichtige Konstruktionswerkstoffe. Edelmetalle sind neben ihrer Verwendung als Schmuck und Zahlungsmittel unverzichtbare Rohstoffe für die Elektro- und Elektronikindustrie. Holz wird als Bauwerkstoff und Rohstoff für die Papierherstellung verwendet. Pflanzenfasern sind wichtige Rohstoffe für die Textilindustrie. Erdöl, Erdgas und Kohle dienen in überwiegendem Maß als fossile Brennstoffe, daneben bilden sie die Rohstoffbasis der gesamten organischen Chemie. Asphalt, ein Gemisch aus hochmolekularen Kohlenwasserstoffen (Bitumen) und Mineralstoffen, dient als Straßenbelag. Asphalt wird heute zwar meist synthetisch hergestellt, es gibt jedoch noch bedeutende natürliche Vorkommen. Das verwendete Bitumen kann wiederum sowohl aus natürlichen als auch synthetischen Quellen, wie etwa der Erdölderivat, stammen.

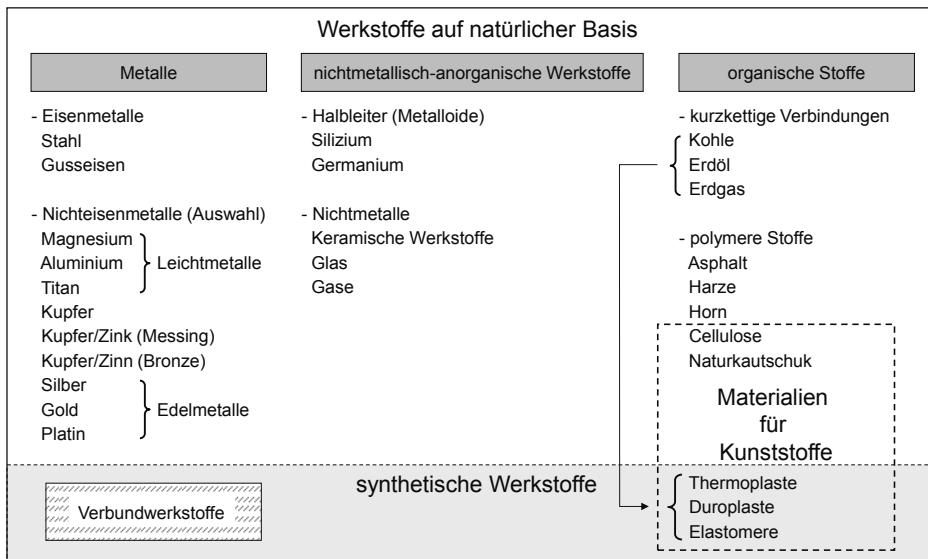


Bild 1.1 Einteilung der Werkstoffe aufgrund ihrer Zusammensetzung

Naturkautschuk, der in riesigen Plantagen angebaut wird, ist ein unverzichtbarer Werkstoff für hoch beanspruchte Elastomererzeugnisse wie beispielsweise Autoreifen. Dagegen haben Harze wie Schellack, Kolophonium oder Bernstein heute nur noch untergeordnete wirtschaftliche Bedeutung und werden hauptsächlich zur Fertigung von Schmuck oder als Pflegemittel für Musikinstrumente (Streichbögen) verwendet.

Die Eigenschaften natürlicher Werkstoffe sind zunächst festgelegt, lassen sich aber in vielen Fällen durch chemisch-thermische Umwandlungen ändern. Dagegen werden synthetische Werkstoffe gezielt hergestellt, um ein bestimmtes Eigenschaftsprofil zu erzielen. Allerdings haben die Bausteine synthetischer Werkstoffe wiederum eine natürliche Basis (Erdöl, Erdgas, Kohle, Minerale), wenn auch oft über den Umweg einer oder mehrerer chemischer Reaktionen.

Die Grenze zwischen natürlichen und synthetischen Werkstoffen verläuft also fließend. Holz ist unbestritten ein natürlicher Werkstoff, die Anwendung als Konstruktionswerkstoff erfordert lediglich mechanische Verfahren, bei denen die grundlegenden Eigenschaften nicht weiter verändert werden. Dagegen erfordert die industrielle Herstellung von Papier aus Holz bereits den Einsatz von Chemikalien. Papier ist demnach also ein umgewandelter Naturstoff.

Naturkautschuk, der feste Bestandteil im Latex des Kautschukbaums, wird erst durch chemische Umwandlung (Vulkanisation in Anwesenheit von Schwefel und Metalloxiden) zu einem technisch wertvollen Material, Gummi. Da dessen Eigenschaften durch geeignete Auswahl der Chemikalien sowie der Reaktionsbedingungen innerhalb bestimmter Grenzen beeinflusst werden, kann man die auf diese Weise erhaltenen Produkte entweder als umgewandelte Naturstoffe oder auch bereits als synthetische Werkstoffe bezeichnen. Auch die Erzeugung von Stahl aus Eisenerz lässt sich sowohl als Umwandlung eines natürlichen Rohstoffs (Eisenerz) als auch zur Herstellung eines synthetischen Werkstoffs (Stahl) mit gewünschten Eigenschaften definieren. Durch Zumischen anderer chemischer Elemente in bestimmten Anteilen (legieren) sowie durch Nachbehandlungen (Glühen, Härteln, Anlassen) lassen sich spezielle Eigenschaften, wie etwa höhere Festigkeit, erzielen. So sind Stähle Legierungen aus Eisen mit bis zu 2 % Kohlenstoff sowie weiteren Elementen wie Chrom, Nickel und Vanadium mit bis zu über 5 % Gesamtanteil. Dabei treten zwischen Eisen und den Legierungselementen keine chemischen Reaktionen auf. Lediglich die Entfernung von überschüssigem Kohlenstoff sowie von Begleitelementen des Eisens (Schwefel, Silizium, Phosphor und Mangan) erfolgt über Oxidation (Reaktion mit Sauerstoff).

Thermoplaste (z. B. Polyethylen) oder Duroplaste (z. B. Epoxidharze) wird man zunächst aber kaum als umgewandelte natürliche Werkstoffe bezeichnen, obwohl die zu ihrer Herstellung erforderlichen Rohstoffe durch verschiedene chemische Reaktionen aus Erdöl gewonnen werden. Erdöl ist aber nichts anderes als ein Verrot-

tungsprodukt von Pflanzen. Man kann also die modernen synthetischen polymeren Werkstoffe (Kunststoffe) auch als umgewandelte Naturprodukte betrachten. Da man das Zusammenfügen einzelner Teile zu einem Ganzen allgemein als Synthese bezeichnet, und die Chemie sich im Wesentlichen mit der Herstellung von Produkten aus bestimmten Ausgangsstoffen befasst, kann man alle Produkte, die aus chemischen Reaktionen hervorgehen, als synthetische (künstliche) Stoffe bezeichnen, unabhängig davon, ob die Ausgangsstoffe natürlichen oder künstlichen Ursprungs sind. Hierzu zählen auch alle durch Transformationsprozesse aus natürlichen Stoffen hervorgegangenen Werkstoffe, also auch die durch das Brennen von Ton erhaltenen frühzeitlichen Keramiken.

Im Allgemeinen Sprachgebrauch werden jedoch lediglich synthetische Polymerwerkstoffe als Kunststoffe bezeichnet. Oft wird auch zwischen Kunststoff und Gummi unterschieden, obwohl – wie zuvor beschrieben – selbst Gummi aus Naturkautschuk ein synthetisches Produkt, also ein Kunststoff, ist. Dies gilt dann natürlich besonders für Gummi auf Basis von Synthesekautschuken. Weiterhin wird bei Kunststoffen oft auch nicht zwischen Thermoplasten und Duroplasten unterschieden. Es sollen im Folgenden alle gezielt, also zur Erlangung bestimmter Eigenschaften, hergestellten polymeren Werkstoffe als Kunststoffe definiert werden, unabhängig davon, ob sie auf natürliche oder synthetische Basis zurückgehen.

■ 1.2 Historische Entwicklung

Keramische Materialien galten für lange Zeit als die ältesten künstlich hergestellten Werkstoffe überhaupt. Nur mineralische und biologische Materialien (Steine, Knochen, Elfenbein) waren bereits länger in Gebrauch. Gebrannter Ton war zwar seit etwa 26.000 v. Chr. bekannt, wurde in Gefäßform jedoch schätzungsweise erst gegen 10.000 v. Chr. benutzt. Seit der Erfindung des Porzellans (etwa 700 bis 800 n. Chr. in China, 1694 in Europa) haben keramische Gefäße bis heute ihren festen Platz unter den Gebrauchsgegenständen. Neue keramische Hochleistungswerkstoffe finden heute in der Automobilindustrie sowie in der Luft- und Raumfahrt Verwendung. Das im Gegensatz zu keramischen Werkstoffen transparente Glas ist seit ca. 1.500 v. Chr. bekannt.

Archäologische Funde deuten darauf hin, dass schon bereits etwa 9.000 Jahre vor der Zeitenwende elementares Kupfer bekannt war. Die gezielte Gewinnung durch Reduktion und Schmelzen von Kupfererzen erfolgte vermutlich schon ca. 6.000 v. Chr. in Vorderasien. Aus dieser Region stammen auch die ältesten Nachweise für eine bewusste Legierung von Kupfer zu Bronze (4.000 v. Chr.) sowie der frühen Verarbeitung von Eisen (um 1.400 v. Chr.). Dabei war man in Europa bis zum 14.

2

Polymere Werkstoffe

■ 2.1 Chemische Grundlagen

Im 5. Jahrhundert v. Chr. postulierte Demokrit kleine und nicht teilbare Partikel mit verschiedener Gestalt und Größe als Urkomponenten der Welt. Sein Lehrer Leukipp hatte bereits darüber philosophiert, wie oft man beispielsweise einen Würfel in jeweils acht Würfel der halben Kantenlänge teilen könne. Ohne einen praktischen Beweis zu haben, kam Leukipp zu dem Schluss, dass man schließlich nicht weiter teilbare Partikel erhält, die er Atome (atomos [griechisch]: unteilbar) nannte. Nach Demokrit gingen aus Verbindungen einer nur begrenzten Zahl solcher Atome alle Körper hervor. Allerdings war die Auffassung des Empedokles, die Welt bestehe nur aus den vier Elementen Feuer, Wasser, Erde und Luft, wesentlich beliebter, und hielt sich fast 2.000 Jahre. Eine erste Sortierung der damals bekannten 21 chemischen Elemente wurde schließlich von Antoine Laurent Lavoisier im Jahr 1789 vorgenommen. Durch die Beschreibung grundlegender chemischer Reaktionen wie Oxidation und Reduktion sowie die Einführung der Begriffe Element, Verbindung, Säure und Base erstellte Lavoisier die wissenschaftliche Basis der heutigen Chemie. John Dalton veröffentlichte im Jahr 1803 eine neue Atomtheorie. Lothar Meyer (1868) und Dimitri Mendelejew (1869) versuchten unabhängig voneinander, die mittlerweile 63 bekannten Elemente in Gruppen mit ähnlichen Eigenschaften zusammenzufassen. Das daraus resultierende heutige Periodensystem (115 Elemente, davon 94 natürliche) basierte ursprünglich auf Mendelejews Einteilung nach steigender Atommasse und Gruppen mit chemisch ähnlichem Verhalten, später wurden die Elemente nach steigender Kernladungszahl (Protonenzahl) sortiert. Die Elementsymbole wurden 1814 von Jöns Jakob Berzelius einge-

führt. Entstanden sind alle chemischen Elemente im Inneren von Sternen; sie werden vor allem durch Supernovaexplosionen freigesetzt.

Chemische Elemente sind Stoffe, die mit chemischen Reaktionen nicht weiter zerlegbar sind. Sie sind aus gleichartigen Atomen aufgebaut. Man kann sich den Aufbau eines Atoms vereinfacht als einen kugelförmigen Kern vorstellen, der von einer Wolke umgeben ist, in der sich Elektronen bewegen. Der Atomkern enthält die positiv geladenen Protonen, deren Anzahl als Ordnungszahl definiert ist, und die elektrisch neutralen Neutronen. In einem einzelnen Atom ist die Anzahl an Protonen und Elektronen identisch, sodass das Atom nach außen elektrisch neutral bleibt. Die Anzahl der Neutronen im Kern kann jedoch bei gleicher Ordnungszahl unterschiedlich sein. Man spricht in diesem Fall von Isotopen. Da Protonen und Neutronen etwa gleich schwer sind, Elektronen jedoch sehr viel leichter, wirken sich unterschiedliche Anzahlen von Neutronen direkt auf die Masse des Atoms auf. Daher wird die Summe der Anzahl von Neutronen und Protonen als sogenannte Massenzahl zur Charakterisierung eines bestimmten Atoms angegeben. Isotope eines chemischen Elementes zeigen aber identisches chemisches Verhalten, da dieses ausschließlich von der Elektronenhülle bestimmt wird.

Anfang des zwanzigsten Jahrhunderts versuchte man zu klären, warum die negativ geladenen Elektronen nicht aufgrund elektromagnetischer Anziehung in den positiv geladenen Kern stürzten. Durch Kombination der klassischen Physik mit der zu dieser Zeit revolutionären und noch nicht überall anerkannten Quantenphysik gelang es schließlich Niels Bohr im Jahr 1913, ein brauchbares Atommodell zu entwickeln, bei dem die Elektronen den Kern auf festen Bahnen wie Planeten eine Sonne umkreisen sollten.

Wie sich später herausstellte, sind die tatsächlichen Begebenheiten jedoch wesentlich komplizierter. Die Elektronenhülle ist ein Konglomerat aus Aufenthaltswahrscheinlichkeiten von Elektronen, den sogenannten Orbitalen. Räumlich gruppieren sich die Orbitale von innen nach außen in verschiedenen Schalen um den Atomkern. Die Schalen sind dabei nicht als Kreisbahnen zu verstehen, sondern als Gebiete mit der höchsten Elektronendichte oder Aufenthaltswahrscheinlichkeit der jeweiligen Elektronen. Obwohl Albert Einstein sich im Jahr 1916 des in der Quantentheorie verbreiteten Wahrscheinlichkeitsbegriffs bediente, um das Bohr'sche Atommodell zu verbessern, war er jedoch davon überzeugt, dass die Beschränkung auf statistische Gesetze nur vorübergehend sein würde: „Die Theorie liefert viel, aber dem Geheimnis des Alten bringt sie uns doch nicht näher. Jedenfalls bin ich überzeugt davon, dass *der* nicht würfelt.“

Die Grundlagen des Orbitalmodells beruhen auf der im Jahr 1925 von Werner Heisenberg, Erwin Schrödinger und Paul Adrien Dirac entwickelten Quantenmechanik, die auch als Wellenmechanik bezeichnet wird. Solange man aber berücksichtigt, dass das Schalenmodell nur einen bildhaften Vergleich für verschieden

Energiezustände der Elektronen darstellt, kann man es für viele Erläuterungen weiter verwenden. Für weitere Details sei auf die Fachliteratur verwiesen.

Von innen nach außen finden immer mehr Elektronen auf den Schalen Platz, die maximale Kapazität einer Schale berechnet sich nach $2 n^2$. Auf der innersten Schalen ($n = 1$) finden also nur zwei Elektronen Platz, auf der nächsten Schale acht, auf der dritten Schale bereits 18 Elektronen und so weiter. Obwohl aber die weiter außen gelegenen Schalen mehr als acht Elektronen fassen, werden sie mit steigender Ordnungszahl nicht kontinuierlich gefüllt. Sobald sie acht Elektronen enthalten, beginnt der Ausbau der nächsthöheren Elektronenschale mit bis zu zwei Elektronen. Erst dann wird bei den als Übergangselementen bezeichneten Atomen die noch unvollständige Schale weiter aufgefüllt. Ursache hierfür ist der energetisch besonders günstige Zustand einer Schale, die mit acht Elektronen gefüllt ist (mit Ausnahme von Wasserstoff und Helium, da die innerste Schale nur zwei Elektronen fasst). Die entsprechenden Positionen im Periodensystem der Elemente werden von den äußerst reaktionsträgen Edelgasen besetzt, die im Gegensatz zu anderen Gasen atomar vorkommen. Die Elektronen der äußersten Schale eines Atoms sind in der Lage, Wechselwirkungen mit den entsprechenden Elektronen von Nachbaratomen einzugehen, und somit chemische Bindungen zu ermöglichen. Man nennt diese Elektronen Valenzelektronen.

Als Antriebskraft für die Bildung chemischer Bindungen gilt das Bestreben, durch Auffüllen der Valenzelektronenschale mit insgesamt acht Elektronen die sogenannte Edelgaskonfiguration zu erreichen. In der Natur liegen daher die meisten chemischen Elemente in gebundener Form vor, das heißt als chemische Verbindung aus Atomen. Diese werden als Moleküle bezeichnet. Auch Gase wie Wasserstoff, Sauerstoff und Stickstoff liegen im Gegensatz zu den Edelgasen nicht atomar vor, sondern bilden chemische Verbindungen mit sich selbst (H_2 , O_2 , N_2). Der in Form von Diamanten und Graphit natürlich vorkommende elementare Kohlenstoff stabilisiert sich über die Fähigkeit, chemische Bindungen mit sich selbst einzugehen.

Es gibt drei Arten chemischer Bindungen: die Metallbindung, die Ionenbindung und die kovalente Bindung.

Metallbindung

Metalle liegen überwiegend als Atomrümpfe in bestimmter Anordnung mit relativ frei beweglichen Valenzelektronen („Elektronengas“) vor. Die Valenzelektronen sind also nicht bestimmten Atomkernen zugeordnet, aber ein einzelnes Atom kann statistisch betrachtet die Edelgaskonfiguration erreichen. Ein freies Elektron verteilt sich dabei auf bis zu zehn Metallatome, was die hohe elektrische und thermische Leitfähigkeit der Metalle erklärt.

Ionenbindung

Atome vermögen auch einzelne Elektronen aus der Elektronenhülle eines benachbarten Atoms herauszulösen, um die Edelgaskonfiguration zu erreichen. Hierdurch werden Atome elektrisch geladen, sie werden zu Ionen. Bei positiver Ladung (fehlende Elektronen) spricht man von Kationen, bei negativer Ladung (überschüssige Elektronen) von Anionen. Durch entsprechende Kombinationen von Kationen und Anionen erhält man nach außen elektrisch neutrale Moleküle, deren innerer Zusammenhalt auf elektromagnetischen Kräften beruht. Die Ionenbindung ist typisch für viele Salze, wie etwa Natriumchlorid (Kochsalz) und viele andere anorganische Verbindungen. Durch Abgabe eines Elektrons wird die Valenzelektronenschale des Natriums geleert, die darunterliegende Schale ist mit acht Elektronen besetzt und besitzt die angestrebte Edelgaskonfiguration. Das Natriumatom wird hierdurch zum einfach positiv geladenen Natriumkation. Das Chloratom füllt mit dem übernommenen Elektron seine Valenzelektronenschale mit einem achten Elektron auf, dadurch wird es zum einfach negativ geladenen Chloranion.

Nach diesem Prinzip stellt etwa Magnesium zwei und Aluminium drei Elektronen zur Verfügung, Phosphor kann drei, Schwefel zwei Elektronen aufnehmen. Auf diese Weise entstehen mehrfach geladene Ionen, das betreffende Element ist mehrwertig. Mit steigender Wertigkeit der beteiligten Atome zeigen ihre chemischen Verbindungen jedoch immer mehr kovalenten Charakter, insbesondere bei Verbindungen mehrwertiger Elemente untereinander.

Kovalente Bindung

Auch durch die Überlappung von Elektronenhüllen benachbarter Atome kann die Edelgasstruktur erreicht werden. Hierzu bilden sich Elektronenpaare, wobei jedes Atom ein Elektron beisteuert. Durch die gemeinsame Anziehung der einzelnen Elektronen von beiden Atomkernen werden sie gewissermaßen auf diese Atome fixiert, wodurch die kovalente Bindung stabilisiert wird. Die kovalente Bindung ist typisch für Kohlenstoff und seine Verbindungen. Ein vollständig mit kovalenten Bindungen zusammengesetztes Großmolekül aus Kohlenstoff ist Diamant, der sich durch die höchste Festigkeit (ausgedrückt als Elastizitätsmodul) aller Stoffe auszeichnet.

Chemische Verbindungen lassen sich im Gegensatz zu Stoffgemischen nicht durch physikalische Methoden (sieben, destillieren, sortieren) trennen. Die für alle Lebewesen unseres Planeten wichtigste chemische Verbindung ist Wasser, das wichtigste Stoffgemisch ist Luft (im Wesentlichen Stickstoff und Sauerstoff).

Anorganische Verbindungen sind meist aus nur wenigen Atomen aufgebaut, in der Regel liegen einfache Strukturen vor. Daher sind anorganische Verbindungen über die in der Chemie übliche Schreibweise der Summenformel aus den Elementsymbolen relativ leicht zu charakterisieren. Die Nomenklatur anorganischer Verbin-

dungen ist daher meistens relativ einfach. So werden in der Summenformel nur die Art und Anzahl der Atome der betreffenden Verbindung genannt. Die Zahlen werden dabei tiefgestellt. Beispiele sind H_2O (Wasser), das demzufolge aus zwei Atomen Wasserstoff (H) und einem Atom Sauerstoff (O) aufgebaut ist, NaCl (Natriumchlorid, Kochsalz) aus je einem Atom Natrium (Na) und Chlor (Cl), NaHCO_3 (Natriumhydrogencarbonat, Natron – Bestandteil von Backpulver) aus je einem Atom Natrium (Na), Wasserstoff (H), Kohlenstoff (C) und drei Atomen Sauerstoff (O).

Durch chemische Reaktionen lassen sich Stoffe umwandeln und neue Verbindungen erhalten. Eine solche chemische Reaktion ist beispielsweise das Entkalken eines Wasserkessels mit Essig. Die in Essig enthaltene Säure (sie wird daher Essigsäure genannt) ist in der Lage, den Kalkstein aufzulösen. Dabei kann man beobachten, dass sich Gasbläschen bilden. Bei genauerer Untersuchung stellt sich heraus, dass der Kalkstein nicht einfach verschwindet, sondern chemisch umgewandelt wurde. Eine Analyse der Komponenten ergibt, dass der Kalkstein (Calciumcarbonat, CaCO_3), mit Essigsäure (CH_3COOH) unter Bildung von Kohlendioxid (CO_2) und einer wasserlöslichen Verbindung, Calciumacetat ($\text{Ca}(\text{CH}_3\text{COO})_2$), reagiert. In Form der in der Chemie üblichen Reaktionsgleichung stellt sich dieser Vorgang wie folgt dar:



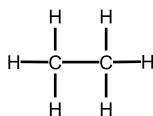
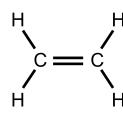
Das Calciumcarbonat zerfällt also in das zweiwertige Calciumion, das sich mit zwei Molekülen der einwertigen Essigsäure zu Calciumacetat verbindet, sowie in Kohlendioxid. Das noch verbleibende Sauerstoffatom aus dem Calciumcarbonat verbindet sich mit zwei Wasserstoffatomen, die von der Essigsäure freigesetzt werden, zu einem Molekül Wasser. In einer chemischen Reaktion gehen also keine Atome verloren, mathematisch müssen solche Gleichungen auf beiden Seiten identisch sein. Etwas ungewohnt ist lediglich die Positionierung der Zahlen in chemischen Reaktionsgleichungen.

Aus den Ausgangsstoffen sind also durch die chemische Reaktion Endprodukte mit völlig anderen Eigenschaften entstanden. Allerdings sagt schon hier die Summenformel nichts über die Anordnung der Atome untereinander, also die Struktur des Moleküls, aus. Die Struktur ist jedoch entscheidend für das Verhalten gegenüber anderen Molekülen. Daher ist bei komplexeren Verbindungen – im Wesentlichen die der organischen Chemie und insbesondere bei Polymeren – die Strukturformel für die genaue Charakterisierung notwendig. Die Summenformeln der anorganischen Chemie sind dagegen meistens eindeutig.

Bei gleicher Summenformel zeigen unterschiedliche Anordnungen von Atomen zum Teil erhebliche Abweichungen in ihren physikalischen und chemischen Eigenschaften (Isomerie). Allerdings kann man auch in der organischen Chemie eine

etwas einfachere Schreibweise verwenden, wenn man funktionell zusammengehörende Atome in Gruppen zusammenfasst. Beispiele für solche Kurzschreibweisen funktioneller Gruppen in der organischen Chemie sind -OH für Alkohole oder -COOH für Säuren. Viele Verbindungen der organischen Chemie basieren auf Kohlenwasserstoffen, erkennbar durch Kürzel wie CH_3- , C_2H_5- , oder C_3H_9- . Durch Kombinationen dieser Gruppen lassen sich Verbindungen wie Ethanol (Ethylalkohol, früher: Äthanol, $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) oder Essigsäure (CH_3COOH) sehr einfach darstellen. Fast alle chemischen Elemente verbinden sich nur in begrenztem Maß mit sich selbst. Eine große Ausnahme ist Kohlenstoff, der sich beliebig oft mit sich selbst verbinden kann. Das Kohlenstoffatom ist vierbindig, es kann sich also mit jeweils vier anderen Atomen verbinden. Dies erlaubt den Aufbau hochkomplexer organischer Verbindungen wie etwa Desoxyribonukleinsäure (DNA) oder anderen Polymeren.

Allerdings finden sich auch Kohlenstoffverbindungen, bei denen nicht alle Bindungsmöglichkeiten ausgeschöpft zu sein scheinen, wie etwa bei Ethen (C_2H_4) im Vergleich zu Ethan (C_2H_6). Von den vier möglichen Bindungen jedes Kohlenstoffatoms wird bei Ethan jeweils eine für die Verbindung zum benachbarten Kohlenstoffatom ausgenutzt, die restlichen drei für die Verbindungen mit Wasserstoff. Bei Ethen jedoch ist jedes Kohlenstoffatom nur mit zwei Wasserstoffatomen verbunden. Es scheinen also nicht alle Bindungsmöglichkeiten ausgeschöpft zu sein, weshalb man auch von ungesättigten Kohlenwasserstoffen spricht. Tatsächlich aber sind die beiden Kohlenstoffatome des Ethens nicht durch eine, sondern durch zwei chemische Bindungen miteinander verbunden. Man spricht hier von einer Doppelbindung (Bild 2.1).

Ethan C_2H_6 Ethen C_2H_4 **Bild 2.1** Vergleich von Einfach- und Doppelbindung am Beispiel Ethan/Ethen

Charakteristisch für solche Doppelbindungen ist, dass ihre einzelnen chemischen Bindungen unterschiedliche Stabilität aufweisen, sich also eine davon relativ leicht öffnen lässt, um sich mit anderen Atomen zu verbinden. In der organischen Chemie ist dies meist wiederum Kohlenstoff. Aus diesem Grunde sind ungesättigte Kohlenwasserstoffe wichtige Rohstoffe für die Herstellung von Polymeren. Liegen mehrere Moleküle einer solchen ungesättigten Verbindung vor, lassen sich diese unter geeigneten Reaktionsbedingungen zu einer einzigen, jedoch größeren Verbindung, zusammensetzen. Dabei geht die Doppelbindung verloren (vergleiche Polymerisation, Abschnitt 2.2).

Auf diese Weise lassen sich beispielsweise sehr viele Ethenmoleküle zu Polyethen zusammensetzen. (Aufgrund des früher gebräuchlichen Begriffs Ethylen für das Monomer hat sich der Name Polyethylen erhalten, dies gilt analog auch für Polypropylen). Die Reaktion läuft jedoch nicht von alleine ab, es sind geeignete Reaktionsbedingungen (Druck, Temperatur) und aktivierende Substanzen (Initiatoren) erforderlich, z.B. Verbindungen mit ungepaarten Elektronen (Radikale) oder Ionen. Eine andere Möglichkeit bedient sich spezieller Metallverbindungen, an denen sich Moleküle mit Doppelbindungen anlagern, wodurch diese geschwächt wird. Die von Ziegler und Natta gefundenen Katalysatoren gehören in diese Kategorie.

Weitere wichtige Monomere sind etwa Propen (früher: Propylen) $\text{CH}_3\text{-CH=CH}_2$, Vinylchlorid $\text{CH}_2=\text{CHCl}$ oder Butadien $\text{CH}_2=\text{CH-CH=CH}_2$. Bei Letzterem wird die Polymerisation durch die besondere Anordnung der Doppelbindungen im Monomer speziell begünstigt (konjugierte Doppelbindungen: die Doppelbindungen wechseln sich mit Einfachbindungen ab).

Aromatische Verbindungen fallen durch ihre vollkonjuguierten Ringstrukturen auf. Die Lage der einzelnen Doppelbindungen ist in solchen Systemen nicht lokalisierbar. Wie schon erwähnt, sind die beiden Bindungen einer Doppelbindung unterschiedlich stark. Bei Aromaten sind die Elektronen der jeweils schwächeren Bindungen über das gesamte Ringsystem verteilt, etwa vergleichbar mit dem Elektronengas bei Metallen. Daher weicht das chemische Verhalten von Aromaten deutlich von dem ungesättigter aliphatischer Verbindungen ab. Die aromatische Ringstruktur wird durch einen Kreis gekennzeichnet. Nur, wenn der Zusammenhang eindeutig ist, werden Summenformeln verwendet (Bild 2.2).

Wie die meisten chemischen Reaktionen läuft auch die Polymerisation erst unter bestimmten Bedingungen ab. (Wenn alle chemischen Reaktionen spontan abliefen wäre Leben auf unserem Planeten nicht möglich). Zur Unterstützung chemischer

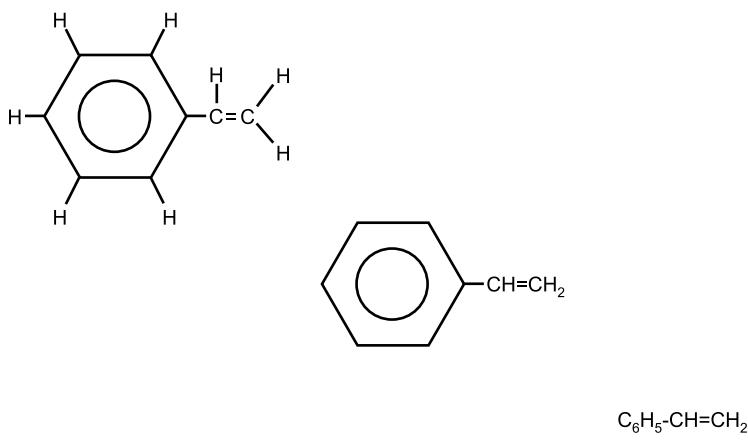


Bild 2.2 Vereinfachte Schreibweise aromatischer Verbindungen am Beispiel Styrol

Reaktionen dienen oft erhöhte Temperatur und/oder erhöhter Druck; meist ist auch die Anwesenheit eines Katalysators erforderlich.

Katalysatoren unterstützen oder ermöglichen chemische Reaktionen, ohne dabei selbst an der Reaktion teilzunehmen. Also werden Katalysatoren theoretisch nicht verbraucht. In der Praxis zeigt sich jedoch, dass diese oberflächenaktiven Substanzen durch Ablagerungen auf ihrer Oberfläche oder eingeschleppte Substanzen im Laufe der Zeit inaktiv werden. So dürfen z.B. Kraftstoffe für Fahrzeuge mit Abgaskatalysator keine Bleiverbindungen zur Verbesserung der Klopffestigkeit enthalten. Abgesehen von ihrer Giftigkeit, würde der Katalysator diese zerlegen, wodurch sich metallisches Blei auf der Oberfläche des Katalysators abscheidet. Damit wird der Katalysator für die Abgasreinigung unbrauchbar. Für die meisten chemischen Prozesse in der Industrie werden Katalysatoren eingesetzt. Dabei erfordern unterschiedliche chemische Reaktionen auch verschiedene Katalysatoren.

■ 2.2 Grundlagen polymerer Werkstoffe

Polymere Werkstoffe sind aus langkettigen Molekülen aufgebaut, den sogenannten Makromolekülen (makros [griechisch] = groß). Diese setzen sich aus sehr vielen (etwa zwischen 10^4 bis 10^6) gleich aufgebauten Teilen, den sogenannten Monomeren (monos [griechisch] = allein) zusammen und werden daher Polymer (polys [griechisch] = viel, meros [griechisch] = Teil) genannt. Das entsprechende Verfahren heißt Polymerisation (Bild 2.3).

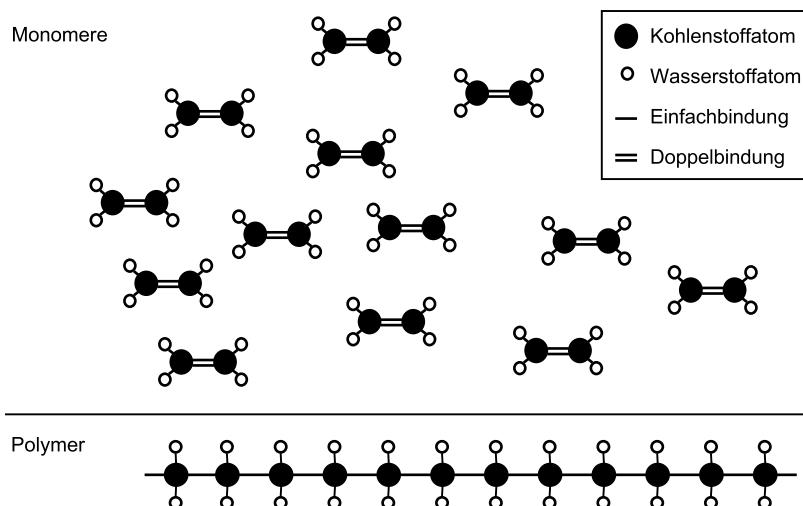


Bild 2.3 Vergleich von Monomeren und Polymer am Beispiel Ethylen/Polyethylen

Zur einfachen und anschaulichen Darstellung der extrem großen Polymermoleküle bedient man sich ebenfalls einer Kurzschreibweise. Längere Moleküle werden als Zick-Zack-Ketten dargestellt, wobei Wasserstoff meist weggelassen wird. Jeder Knick sowie die Anfangs- und Endpunkte stehen für ein Kohlenstoffatom mit den dazugehörigen Wasserstoffatomen. Noch einfacher ist die Verwendung von Summenformeln mit Indizes für die Anzahl der jeweiligen Monomersegmente. Die Segmentgröße wird meist im Kontext angegeben, etwa $n = 20.000$. Allerdings sagen solche Schreibweisen nichts über die tatsächliche Verteilung der Monomere aus (statistisch, alternierend, in Segmenten/Blöcken oder gepropft), Bild 2.4.

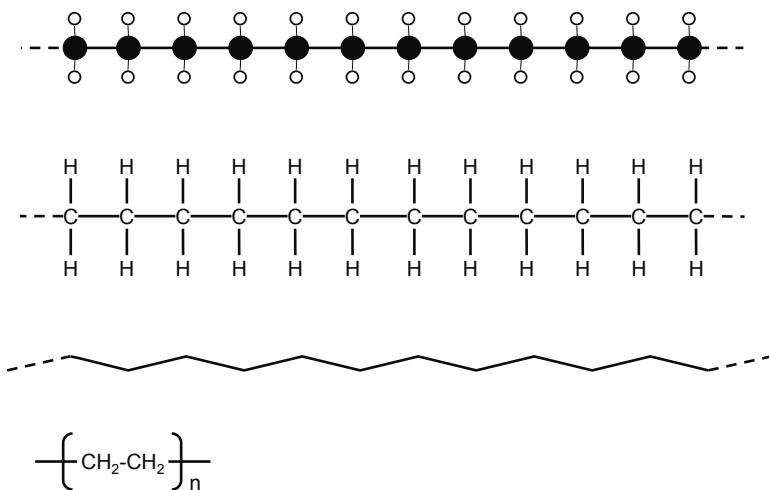


Bild 2.4 Verschiedene Schreibweisen für Polyethylen

Monomere sind chemische Verbindungen, die die Eigenschaften der Polymere bestimmen. Durch entsprechende Wahl der Monomere und Steuerung der Polymerisation ist es möglich, gezielt Werkstoffe mit neuen Eigenschaften herzustellen. Je nach Monomer und Reaktionsbedingungen entstehen bei der Polymerisation bei gleicher Summenformel unterschiedliche räumliche Strukturen. Die Reaktionsbedingungen entscheiden beispielsweise über die durchschnittliche Kettenlänge, die Molmassenverteilung sowie die Entstehung linearer oder verzweigter Polymere (Bild 2.5). Aufgrund ihrer größeren räumlichen Ausdehnung haben verzweigte Polymere eine etwas geringere Dichte und eine geringere Kristallisationstendenz; das parallele Zusammenlagern der Makromoleküle wird durch die sperrigen Verzweigungen erschwert. Weiterhin weisen verzweigte Polymere höhere Schmelztemperaturen als lineare Polymere aus den gleichen Grundbausteinen auf.

Bei der Polymerisation ungesättigter Verbindungen öffnet sich, ausgelöst durch spezielle Initiatormoleküle, jeweils eine der Bindungen aus der Doppelbindung und bindet sich an das nächste Monomermolekül. Auf diese Weise findet ähnlich

■ 3.3 Standardkunststoffe: Eigenschaften, Charakteristik, Anwendungen

3.3.1 Polyethylen (PE)

Mit rund 30 % Anteil an der Gesamtmenge ist Polyethylen der am meisten verwendete Kunststoff. Polyethylen ist ein teilkristalliner und unpolarer Thermoplast. Durch die Wahl der Polymerisationsbedingungen lassen sich Molmasse, Molmassenverteilung, mittlere Kettenlänge und Verzweigungsgrad einstellen. Aufgrund der unterschiedlichen Dichte unterscheidet man in vier Haupttypen, wobei die Kurzbezeichnungen nicht immer einheitlich verwendet werden:

- Polyethylen hoher Dichte (high density), PE-HD oder HDPE
- Polyethylen mittlerer Dichte (medium density), PE-MD oder MDPE
- Polyethylen niedriger Dichte (low density), PE-LD oder LDPE
- lineares Polyethylen mit niedriger Dichte (linear, low density), PE-LLD oder LLDPE

Weitere wichtige Typen sind:

- Polyethylen mit ultrahoher Molmasse (ultra-high molecular weight), PE-UHMW oder UHMWPE
- Polyethylen mit sehr niedriger Dichte (very low density), PE-VLD oder VLDPE

Die Dichte von PE-VLD liegt zwischen 900 und 930 kg/m³; bei PE-HD zwischen 940 und 970 kg/m³.

Die niedrige Dichte der PE-LD-Typen resultiert aus dem hohen Anteil kurz- und langketiger Verzweigungen, die eine enge Zusammenlagerung der Polymerketten verhindert. Daher haben PE-LD-Typen mit etwa 35 % auch einen geringeren Kristallisationsgrad als PE-HD-Typen (etwa 80 %). Sie haben auch eine höhere Lichtdurchlässigkeit, die bei dünnen Folien bis zur Transparenz reichen kann. Der höhere Kristallisationsgrad von PE-HD ist auch die Ursache für dessen höhere Schmelztemperatur.

Festigkeit, Härte und Steifigkeit von PE sind geringer als bei den meisten anderen Thermoplasten, allerdings weist PE hohe Dehnbarkeit und Kälteschlagfestigkeit sowie gutes Gleitreibverhalten auf. Für im Spritzgussverfahren hergestellte Formteile werden Typen mit hoher Molmasse verwendet, wobei PE-HD-UHMW aber nicht mehr thermoplastisch verarbeitbar ist. PE lässt sich zu sehr festen Verstärkungsfasern verstrecken, die Festigkeit beruht dabei auf einer durch das Verarbeitungsverfahren erzielten extrem hohen Kristallinität. Die maximale Dauergebrauchstemperatur liegt je nach Typ bei etwa 60 bis 85 °C, kurzzeitig sind 80 bis 120 °C möglich (etwa 150 °C bei PE-HD-UHMW).

PE hat gute elektrische Isoliereigenschaften und besitzt eine gute chemische Beständigkeit gegenüber einer Vielzahl von Säuren, Basen, Ölen und Fetten. Während PE-LD nur sehr eingeschränkt gegenüber Kohlenwasserstoffen beständig ist, kann PE-HD auch für Kraftstoffbehälter verwendet werden. (Im Allgemeinen nimmt die chemische Beständigkeit mit steigender Kettenlänge zu). Oft werden solche Behälter zusätzlich mit Barrierefolien oder einer Plasmabeschichtung ausgerüstet, da PE eine hohe Gasdurchlässigkeit (Permeation) aufweist. Starke Oxidationsmittel wie hoch konzentrierte anorganische Säuren sowie Halogene greifen PE an. PE ist brennbar und nicht witterungsbeständig, daher sind Additive wie Flammschutzmittel und UV-Absorber erforderlich.

Die Hauptanwendung von PE sind Folien und Verpackungen, wie etwa durch Blasformen hergestellte Kanister, einfache Spritzgussteile sowie Rohre und Kabelisolationen. PE-Pulver werden zur Beschichtung von Textilien oder Papier verwendet.

Technische Bedeutung haben folgende Spezialtypen und Copolymeren erlangt:

- **chloriertes Polyethylen (PE-C):** zur Erhöhung der Flammwidrigkeit von Polyolefinen oder zur Erhöhung der Schlagfestigkeit von PVC; vernetzt als witterungsbeständiges und leicht einfärbbares Elastomer für Kabelmäntel
- **chlorsulfonierte Polyethylen (CSM):** kautschukelastisch, vernetzt für Kabelisolationen, beschichtete Gewebe, Dachfolien, Schlauchdecken und Schlauchboote
- **Ethylen-Vinylacetat-Copolymeren (EVAC):** bis 10% Vinylacetat für Gewächshausfolien, Rohre, Faltenbälge mit hohem Rückstellvermögen;
 - bis 30% Vinylacetat für thermoplastische Kabelummantelungen;
 - bis etwa 40% Vinylacetat für Klebstoffe;
 - über 40% Vinylacetat vernetzt als Elastomer (EVM) mit sehr hohem Füllstoffanteil fast ausschließlich für Kabelisolationen (FRNC-Kabel)
- **Ethylen-Vinylalkohol-Copolymeren (EVOH):** 53 bis 68% Vinylalkohol; minimale Gasdurchlässigkeit; für Barrierefolien
- **vernetztes Polyethylen (PE-X):** Elastomer; Rohre für Warmwasser und Fußbodenheizungen
- **PE-Compounds mit etwa 6 % Stärke:** für biologisch abbaubare Produkte (Tragetaschen, Müllsäcke). Dabei wird nur die Stärke abgebaut, die umhüllende PE-Matrix jedoch nicht. Die bei PE schon vorhandene Empfindlichkeit gegenüber UV-Licht kann aber durch Einbau spezieller, UV-empfindlicher Molekülgruppen weiter erhöht werden, sodass ein fotochemischer Abbau möglich ist.
- **Cycloolefin-Copolymeren (COC):** werden beispielsweise durch Copolymerisation von Ethylen mit zyklischen Olefinen wie Norbonen hergestellt. Teilkristalline Typen weisen eine hohe Wärmeformbeständigkeit und gute chemische Beständigkeit auf.

7

Kunststoffe und Umwelt

■ 7.1 Aktuelle Situation im Jahr 2019

Die Entwicklung der Kunststoffe basierte – ebenso wie die der synthetischen Farbstoffe oder Synthesefasern – auf einem steigenden Bedarf nach Alternativen für knappe oder teure Naturstoffe (vgl. Abschnitt 1.2). Im Zuge der zunehmenden Industrialisierung und der damit verbundenen Fortschritte in Hygiene und Medizin stiegen sowohl Lebenserwartung als auch Lebensstandard. Damit einher begann ein im Vergleich zu den vorhergehenden Jahrhunderten steilerer Anstieg der Weltbevölkerung auf mittlerweile 7,8 Milliarden Menschen, mit weiter zunehmender Lebenserwartung insbesondere in den industrialisierten Ländern. Der steigende Wohlstand brachte automatisch auch einen wachsenden Bedarf an Konsum- und Industriegütern mit sich, sowie den Wunsch nach individueller Mobilität. Alle diese Bedürfnisse lassen sich heute nicht mehr ohne die Produkte der modernen Chemie, wie etwa Düngemittel und Pharmazeutika, aber auch Kunststoffe und Synthesefasern, erfüllen. Denn bei fundierter Berechnung wird schnell klar, dass es nicht möglich ist, die gesamte Menschheit auf Basis landwirtschaftlicher Methoden des 18. oder 19. Jahrhunderts ausreichend zu ernähren oder zu kleiden, um nur zwei Grundbedürfnisse zu nennen. So ist es schon alleine aufgrund der begrenzten Menge an landwirtschaftlich nutzbaren Flächen in klimatisch dazu geeigneten Zonen nicht möglich, Kleidung nur aus Baumwolle anzufertigen. Zudem würden die benötigten Megaplantagen mit ihrer Monokultur erhebliche Mengen an Pestiziden und Insektiziden erfordern. Auch der Wasserbedarf ließe sich mit dem vorhandenen Trinkwasser bei weitem nicht mehr decken. Die oft angeführte Lösung einer Entsalzung von Meerwasser ist recht energieintensiv (3 bis 10 kWh/m³) und technisch und ökologisch nicht unproblematisch. Es sei darauf hingewiesen, dass es immer noch viele Regionen auf diesem Planeten gibt, die noch nicht einmal über genügend sauberes Trinkwasser verfügen. Werkstoffe und Kraftstoffe auf Basis nachwachsender Rohstoffe stehen außerdem bereits in Kon-

kurrenz zur Produktion von Nahrungs- und Futtermitteln, da die verfügbare geeignete Anbaufläche unseres Planeten begrenzt ist, insbesondere unter dem Gesichtspunkt einer wachsenden Weltbevölkerung und einem weiter steigenden Bedarf an Fleisch. In der europäischen Union werden bereits 60% des Getreides als Futterpflanzen angebaut. Weiterhin wird bereits jetzt eine zunehmende Versteppung der nutzbaren Ackerfläche aufgrund des Klimawandels beobachtet.

Hochwertige technische Thermoplaste lassen sich allenfalls indirekt, unter Zusatz weiterer Chemikalien und mit überproportional hohem Bedarf an Wasser auf Basis natürlicher Rohstoffe gewinnen. Mit der Produktion biobasierter Kunststoffe steigt selbstverständlich auch der Bedarf an Düng- und Pflanzenschutzmitteln, insbesondere bei großflächigem Anbau, sowie für Brennstoffe der Landmaschinen. Der CO₂-Ausstoß würde zwar verringert, aber dafür wäre eine Verdichtung des Bodens, ein Rückgang der Artenvielfalt, eine vermehrte Bildung giftiger Algen sowie eine deutliche Verschlechterung der Wasserqualität zu befürchten (Eutrophierung). Insofern würden sich die ökologischen Konsequenzen nur verschieben, aber nicht reduzieren. Daher sind auch Schätzungen, dass „nur“ rund 10% der weltweiten Anbauflächen ausreichten, um den Weltbedarf an Kunststoffen zu decken, in der Praxis nicht umsetzbar und somit ins Reich der Fabel zu verweisen. Es ist schlichtweg nicht möglich, synthetische Werkstoffe vollständig durch solche aus nachwachsenden Rohstoffen zu ersetzen. Außerdem wird oft nicht berücksichtigt, dass ein auf rein biologischer Basis erzeugter Kunststoff nicht automatisch auch biologisch abbaubar ist (vgl. Abschnitt 3.8).

Allerdings lohnt es sich, den Einsatz synthetischer Werkstoffe in bestimmten Anwendungen zu überdenken. Es liegt auf der Hand, dass eine Schonung von Ressourcen und eine Reduktion klimaverändernder Effekte nur durch einen geringeren Verbrauch von Rohstoffen zu verwirklichen ist. Insofern sollte auch die Massenproduktion billiger Konsumartikel mit geringer Lebensdauer kritisch hinterfragt werden; insbesondere, wenn diese in Ländern mit geringeren Arbeits- und Umweltstandards hergestellt werden.

Kunststoffe zeigen die höchste Wachstumsrate aller Werkstoffe. Wichtigste Gründe sind ihre geringe Dichte, die geringe Wärmeleitung, die elektrische Isolationswirkung sowie die preisgünstige Massenfertigung auch von Artikeln mit komplexer Gestalt. Die im Vergleich zu Metallen geringere Dichte erlaubt die Fertigung leichterer Teile gleichen Volumens, für die zudem geringere Energie- und Transportkosten anfallen. Im Fahrzeugbau tragen Kunststoffe, die Bauteile aus Metall ersetzen, durch ihr geringeres Gewicht zur Einsparung von Kraftstoff und damit reduziertem Ausstoß von Kohlendioxid und anderen Schadstoffen bei. Je geringer das Gewicht, desto größer ist die Reichweite – ein Dreh- und Angelpunkt insbesondere bei elektrisch angetriebenen Kraftfahrzeugen. In Gebäuden bewirken Dämmwerkstoffe aus Kunststoff einen geringeren Bedarf an Heizbrennstoffen und damit weniger Emissionen. Wärmedämmende Elemente aus Kunststoff sind auch wesentliche

8

Übersichtstabellen

Die Kurzzeichen für Kunststoffe sind in ISO 1043 festgelegt. Teil 1 gibt die Kurzzeichen für Basis-Polymere und ihre besonderen Eigenschaften vor, Teil 2 charakterisiert Füll- und Verstärkungsstoffe, Teil 3 Weichmacher und Teil 4 Flammschutzmittel. In Tabelle 8.7 werden die wichtigsten Kurzzeichen für Basispolymere angegeben.

Tabelle 8.1 Kurzzeichen für Kunststoffe nach ISO 1043

Kurzzeichen	Bezeichnung
ABS	Acrylnitril-Butadien-Styrol
AES	Acrylnitril-Ethylen-Propylen-Dien-Styrol
ASA	Acrylnitril-Styrol-Acrylat
CA	Celluloseacetat
CAB	Celluloseacetobutyrat
CAP	Celluloseacetopropionat
COC	Cycloolefin-Copolymer
EP	Epoxidharz
EVAC	Ethylen-Vinylacetat-Copolymer
EVOH	Ethylen-Vinylalkohol-Copolymer
LCP	Flüssigkristall-Polymer (Liquid-Crystal-Polymer)
MF	Melamin-Formaldehyd-Harz
PA	Polyamid
PAEK	Polyaryletherketon
PAI	Polyamidimid
PBT	Polybutylenterephthalat
PC	Polycarbonat
PE	Polyethylen
PEEK	Polyetheretherketon
PEEK	Polyetheretherketonetherketon

Tabelle 8.1 Kurzzeichen für Kunststoffe nach ISO 1043 (Fortsetzung)

Kurzzeichen	Bezeichnung
PEI	Polyetherimid
PEK	Polyetherketon
PES	Polyethersulfon
PET	Polyethylenterephthalat
PF	Phenol-Formaldehyd-Harz
PHB	Polyhydroxybutyrat
PI	Polyimid
PLA	Polylactid
PMMA	Polymethylmethacrylat
POM	Polyoxymethylen
PP	Polypropylen
PPE	Polyphenylenether
PPS	Polyphenylensulfid
PPSU	Polyphenylensulfon
PS	Polystyrol
PSU	Polyarylsulfon
PTFE	Polytetrafluorethylen
PUR	Polyurethan
PVC	Polyvinylchlorid
PVCVAC	Vinylchlorid-Vinylacetat
PVDC	Polyvinylidenchlorid
PVDF	Polyvinylidenfluorid
SAN	Styrol-Acrylnitril
SBS	Styrol-Butadien-Styrol-Block-Copolymer
TPE	thermoplastisches Elastomer
UF	Harnstoff-Formaldehyd-Harz
UP	ungesättigtes Polyesterharz

Index

A

Abrieb 42
Acetatseide 17
Acrylatkautschuk 95
Acrylglas oder kurz Acryl 127
Acrylnitril-Butadien-Kautschuk 13, 94
Acrylnitril-Butadien-Styrol-Kunststoff 121
Acrylnitril-Styrol-Acrylat-Kunststoff 122
Additive 93
Agrarfolien 150f., 153
Aktivatoren 92
aktive Füllstoffe 93
akustische Eigenschaften 50
aliphatische Verbindungen
(Aliphaten) 261
Alkoholyse 232
Alliance to End Plastic Waste 214
Allotropie 55
Alterung 216, 224
Alterungsschutzmittel 93, 166
Alt Fahrzeug-Verordnung 224, 228
Aminoplaste 79, 99
amorphe Thermoplaste 27, 87
Anisotropie 179, 261
anorganische Verbindungen 261
Antihafbeschichtungen 134
Antistatika 168
Anvulkanisation 9, 93
Anwendungen 112
Aramidfasern 126, 163
Armaturentafeln 133
aromatische Verbindungen
(Aromaten) 73, 261

Asphalt 2, 7
ataktisch 76
Atome 68
Aufbereiten 172
Aushärten 55
Auskleidungen 134

B

Bakelit 18
Bälge 96, 144f., 149
Barrierefolien 54, 153
Baudübel 126
Baulager 95
Bedienelemente 147
Behälter 100
Bembergseide 16
Bernstein 3
beschichtete Gewebe 95
Beschichtungen 137
Beständigkeit 89
Bioabfallbeutel 153
Biokompatibilität 137
biologische Abbaubarkeit 151
Biopolymere/Biokunststoffe 149
Birkenpech 7
Bitumen 2
Blasformen 88
Blends 78, 97, 121, 126f., 129, 131, 133,
151, 182
Blockcopolymere 143
Blu-ray Discs 129
Bootsrumpfe 100

Brandverhalten 203
 Brems- und Kupplungssteile 99
 Brillenfassungen 153
 Bruchdehnung 262
 Bruchspannung 262
 BtL-Kraftstoffe 234
 Buna® 13
 Butadien 73, 90
 Butadien-Acrylnitril-Kautschuk 121
 Butadienkautschuk 21, 52, 121
 Butylkautschuke 96

C

CAMPUS 199
 Casein 13
 Cellon 16
 Cellophane 16
 Celluloid 15
 Celluloseacetat 16
 Celluloseacetobutyrat 153
 Celluloseacetopropionat 153
 Cellulosehydrat 153
 Chardonnet-Seide 16
 Charpy 202
 ChemCycling 232
 Chemikalienschläuche 95
 chemische Beständigkeit 51, 250
 chemische Bindungen 69
 chemische Elemente 68
 chemischer Apparatebau 118
 Chlorhydratkautschuke 96
 chloriertes Polyethylen 113
 Chloroprenkautschuk 22, 85, 94
 chlorsulfonierte Polyethylen 113
 Circular Plastics Alliance 214
 Coextrusionstechnik 182
 Compact Discs (CD) 129
 Copolymerisation 78
 Cradle to Cradle 228
 CreaSolv 231
 Cryogenverfahren 222
 Cycloolefin-Copolymere 113

D

Dachfolien 95
 Dachmodule 130
 Dämmmaterialien 100
 Dämpfungselemente 146
 Depolymerisation 232
 Dichte 29
 Dichtungen 95f., 135, 137f., 144, 146
 Dielektrizitätszahl 204
 Diffusion 54
 Digital Versatility Discs (DVD) 129
 Dithiocarbamate 12
 Doppelbindung 72
 Doppelbrechung 130
 Druckverformungsrest 205
 duktile Verhalten 39, 263
 Durchgangswiderstand 263
 Duroplaste 27, 80, 98
 dynamische Belastung 43
 dynamische Vulkanisation 143

E

Ebonit 91
 Edelgaskonfiguration 69
 Einwegbecher und -bestecke 151
 Elastizitätsmodul, E-Modul 31, 263
 Elastomere 27, 40, 80, 90
 Electroplating 198
 elektrische Leitfähigkeit 49
 elektrische Prüfungen 204
 elektrisch leitfähige Polymere 139
 Elektroisolierfolien 128
 Elektroisolierlacke 126
 Elektronen 68
 Elektronengas 27, 69
 Elektronenschale 69
 elektrostatische Aufladung 49
 Elektrotechnik 100, 121, 130, 134, 136f.
 Ellen MacArthur Foundation 214
 energieelastisches Verhalten 31
 energiereiche Strahlung 54
 entropieelastisches Verhalten 84, 92
 Epoxidharze 79, 99, 194

- Ermüdungsverhalten 43
 ESD (electrostatic discharge) 49
 Estergummi 21
 Ethan 72
 Ethylen-Propylen-Kautschuk 23, 96
 Ethylen-Vinylacetat-Copolymere 113
 Ethylen-Vinylalkohol-Copolymere 113
 EU-Richtlinie 2012/19 223
 EU-Richtlinie 2015/720 211
 EU-Richtlinie 2018/852 220
 EU-Richtlinie 2019/904 211
 Extenderfüllstoffe 92
 Extrusion 88, 93, 179
 Extrusionsblasformen 182
- F**
- Fahrzeugrücklichter 127
 Faltenbälge 113
 Farbmittel 82, 167
 Fasern 122
 Faseroptiken 138
 Faserwerkstoffe 162
 Federelemente 132
 Feinmechanik 125
 Fensterprofile 118
 Filmscharniere 44, 114, 264
 Filter- und Pumpengehäuse 125
 Fischer-Tropsch-Synthese 234
 Flammenschutzmittel 164
 Flaschen 128
 Fließen 34, 36
 Fluorkautschuke 96
 Fluorkunststoffe 134
 Folien 112, 117
 Förderbänder 96, 154
 Fordlandia 12
 Formbeständigkeitstemperatur 86, 202
 Formgebung 93
 Formteile 98, 100, 130
 Formverschmutzung 89
 fotoabbaubare Kunststoffe 154
 Friction 92
 Fügen 191
- Füllstoffe 92, 161
 Fußbodenbeläge 117
- G**
- Gagat 13
 Galalith 16
 Galvanisieren 131, 198
 Galvanisierung 121
 Gartenmöbel 114
 Gasdurchlässigkeit 54
 Gasinjektion 178
 Gas- und Kupplungspedale 124
 Gebrauchstemperatur 45, 202
 Gebrauchstemperaturbereich 83, 264
 Gehäuse für Elektrowerkzeuge 125
 Gehäuse für Haushalts- und Elektrogeräte 130
 Gehäuse in der Elektronikindustrie 119
 Gehäuseteile von Elektrowerkzeugen 131
 Geisternetze 212
 gelbe Tonne 222
 Gießelastomere 101
 Glanzstoff 16
 Gläser 28
 glasfaserverstärkte Kunststoffe 19, 163
 Glastemperatur 85
 Glastemperatur, Glasübergangstemperatur 27, 45, 265
 Gleiteigenschaften 134
 Gleitelemente 138
 Gleitlager 125, 134, 137
 Gleitmittel 168
 Global Automotive Declarable Substance List 224
 Global Plastic Alliance 214
 Global Plastics Flow 219
 Glühdraht 204
 Great Pacific Garbage Patch 213
 Griffteile 147, 153
 Gummi 7, 90, 154
 gummielastische Eigenschaften 90
 gummielastisches Verhalten 97
 GWFI – Glow wire flammability 204
 GWIT – Glow wire ignitability 204

H

Haftmittel 93
 Halbzeuge 55, 265
 Härte 42, 83, 143, 204
 Hartgummi 91
 Hartschaum 100
 Hart/Weich-Kombinationen 178
 Haushaltsgeräte 99
 Haushaltswaren 121
 heat build up 45
 Heat Distortion Temperature 203
 Hebel 132
 Heißkanäle 174
 Heißpressen 55
 Heizbälge 95
 Heizelementschweißen 192
 Hevea brasiliensis 7
 Hinterspritztechnik 178
 Hinweisschilder 127
 Hochdruckpolyethylen 23
 Hochleistungskunststoffe 134
 Hochleistungs- oder Hochtemperaturkunststoffe 110
 Hybridbauweise 124
 Hydrolyse 52, 232, 265
 Hygieneprodukte 151

I

IMDS-Datenblatt 224
 impact modifier 142
 Imprägnierung 117, 134
 Injection Blow Molding 182
 Innenmischer 92
 Integralschäume 100, 187
 intrinsisch leitfähige Polymere 139
 Ionen 79
 Ionenbindung ff 69
 Ionengitter 28
 Isopren 11, 90
 isotaktisch 76
 Isotope 68
 Isotropie 266
 Izod 202

K

Kabel 95f., 98, 135, 144, 146, 149
 Kalandrieren 185
 Kaltschweißen 195
 Kämme 153
 Karosserien 100
 Karosserieteile 114
 Kasein 16
 Kaskadenspritzgießen 179
 Katalysatoren ff 73
 Kautschuk 7, 58, 91, 155
 Keilriemen 95
 Keilriemenscheiben 138
 Kennwerte von Thermoplasten 199
 Keramische Werkstoffe 28, 35
 Kerbschlagbiegeversuch 202
 Kettenabbau 52, 54, 89
 Kfz-Heizungssysteme 118
 Kfz-Innenraumteile 121, 131
 Kfz-Karosserieteile 131, 133
 Kfz-Motorraum 124
 Kfz-Unterbodenschutz 117
 Klebebänder 128
 Kleben 194
 Klebstoffe 118, 153
 Knöpfe 153
 kohlenstofffaserverstärkter Kohlenstoff (CFC) 99
 Kohlenwasserstoffe 27, 72, 266
 Kohleverflüssigung 234
 Kolbenringen 137
 Kollodium 14
 Kolophonium 3
 Kompostieren 149
 Kondensationspolymerisation 79
 konjugierte Doppelbindungen 73
 Konstruktionsregeln 175
 Konstruktionswerkstoffe 28, 59
 kovalente Bindung 28, 69, 83
 Kraftstoffbehälter 113
 Kraftstoffleitungen und -tanks 124
 Kratzfestlacke 129
 Kreislaufwirtschaft 215
 Kriechen 37

Kriechstromfestigkeit 204
 Kristallisation 85, 141
 Kristallisationsgrad 27
 Kristallite 46, 87
 Kristallit-Schmelztemperatur 27, 45, 85
 Küchenarbeitsplatten 127
 Kugeleindrucktemperatur 203
 Kunstfasern (Acryl) 121
 Kunstfasern (siehe Synthesefasern) 198
 Kunstleder 117
 Kunstseide 16
 Kunststoffabfälle 212, 219
 Kunststoffadditive 161
 Kunststoffbedarf 64
 Kunststoffe 4
 Kunststoffmüll 220
 Kunststoffproduktion 58
 Kunststoff-Tragetaschen 211
 Kupferkunstseide 16
 Kupplungselemente 132

L

Laccain 18
 Lacke 100, 153
 Laminate 100
 Lampengehäuse 124
 Laserschweißen 193
 Latex 7
 legieren 3
 Leitruße 49
 Leuchtenabdeckungen 127
 Lexan® 23
 Lichtkuppeln 153
 Lichtschutzmittel 166
 Lichtwerbung 127, 153
 lineare Polymere 75
 Linoleum 15
 Linsen 130
 Löwenzahn 154
 Luftsäcke für Reifen 95
 Luft- und Raumfahrt 137

M

Makrolon® 23
 Makromoleküle ff 74
 Marine-Litter 212, 220
 Massenzahl 68
 Massestemperatur 45, 86, 266
 Mastikation 9
 Matratzen 100
 maximal zulässige Dehnung 38
 mechanische Eigenschaften 201
 Medizintechnik 130, 135, 137, 153
 Mehrkomponentenspritzguss 178
 Melaminharze 18
 Membranen 95
 Metalle 31
 metallisieren 198
 Methylkautschuk 12
 Micellen 19
 Migration 51
 Mikroplastik 213
 Mikrowellengeschirr 137
 Mineralfasern 45
 Mischwalzwerk 93
 Möbelbeschläge 118, 128, 132
 Moleküle 69
 Molmasse 266
 Monomeren ff 74
 Motorlager 95
 Motorraum 126
 Mowilith 20
 Müllbeutel 150
 Muttern 125

N

Natural Oil Polyols 155
 Naturkautschuk 3, 6, 85, 90, 94, 154
 Natürliche Polymere 7
 Nebenvalenzkräfte 83, 267
 Neoprene® 13
 Neutronen 68
 New Plastics Economy 214
 Nieten 195
 Nitrilkautschuk 121

Nitrocellulose 14

Nitrolacke 16

Nylon® 22

O

Oberflächen- und Durchgangs- widerstand 204

Ocean Cleanup Interceptor 215

Öle 51f.

Olefine 267

Operation Cleansweep 214

optische Eigenschaften 49

optische Speichermedien 129

optische Teile 127, 130

Orbitale 68

Ordnungszahl 68

organische Verbindungen 267

Ozon 52, 165

Ozonschutzmittel 53

P

Parkesin 15

Perlon® 22

Permittivität 204

Phenoplaste 17, 79

physikalische Vernetzung 141

Pigmente 167

Plasmabeschichtung 198, 268

Plastiktüten 211

plastische Verformung 33

Platten (Bausektor) 130

Plexiglas® 21

Polster 100

Polyacrylnitril 120

Polyaddition 79

Polyamide 79, 104, 110

Polyamidimide 137

Polyaryletherketone 111, 136

Polyarylsulfone 135

Polybutylensuccinat 152

Polybutylenterephthalat 104, 129

Polycarbonat 23, 79, 105, 129

Polychloropren 194

Polyester 52, 79, 129

Polyesterharze 19, 99

Polyetherimide 137

Polyethersulfone 135

Polyethylen 104, 110, 112

Polyethylenterephthalat 23, 110, 127

Polyhydroxybuttersäure 151

Polyimide 111, 137

Polykondensation 79

Polylactide 151

Polymerblends (TPE) 143

polymere Werkstoffe 80, 83

Polymerisation 74, 79

Polymerisationsgrad 77

Polymerlegierungen 143

Polymethylmethacrylat 21, 110, 126

Polyoxymethylen 110, 132

Polyphenylenether 132

Polyphenylensulfid 111, 136

Polyphenylensulfone 135

Polypropylen 110, 114

Polystyrol 21, 119

Polystyroltypen 110

Polysulfone 111

PolyTalk 213

Polytetrafluorethylen 22, 51, 111, 134

Polyurethane 22, 52, 79, 82, 97ff., 155, 194

Polyvinylacetat 20

Polyvinylalkohole 153

Polyvinylchlorid 20, 110, 115

Polyvinylidenchlorid 20

Polyvinylidenfluorid 121, 135

Prägefolien 116

Pre Consumer Material 225

Primärenergiebedarf 62, 209

Profile (ohne Dichtungsprofile) 117, 144, 146

Protonen 68

Prototypen 125

Pyrolyse 11, 233, 269

Pyrolyseöl 233

Q

Quellung 51
Querkontraktion 31, 269

R

Radikale 73, 79, 269
Raketenbauteile 99
Rapid Prototyping 269
Recycling 215
Recyclingraten 220
Regenerate 227
Reibung 42
Reifen 95f.
Reifen (ohne Kfz-Reifen) 126, 145
relativer Temperaturindex (RTI) 203
relativer Temperatur Index (RTI) 269
Reyon 17
rheologische Eigenschaften 200
Riemen 98
RIM (Reaction Injection Molding) 125
Risszähigkeit 35
Risszähigkeit und Risswiderstand 269
Rohre 114, 117f., 127, 135
rohstoffliches Recycling 232
Rollen 101, 125, 128, 145, 149
Rollläden 118
Rotationsformen (Rotomolding) 185
Rubber 8
Ruß 93f., 162, 166

S

Sandwichverfahren 8
Sanitärteile 99, 127
Sauerstoffalterung 233
Schallplatten 118
Schall- und Wärmedämmung 119
Schäumen 187
Schäumen von Polystyrol 23
Schaumstoffe 22, 30, 187
Schellack 3, 17
Schichtpressstofftafeln 100
Schießbaumwolle 14

Schiffbau 99f.
Schlagzähmodifikatoren 168
Schläuche 95f., 98, 117, 144
Schleuderguss 186
Schmelze 89
Schmelze-Masse-Fließrate 200
Schmelze-Volumen-Fließrate 200
Schmelzindex 200
Schmelzkerntechnik 179
Schmelztemperaturen 46
Schnappverbindungen 39, 196
Schrauben 125, 195
Schrauben und Muttern 132
Schreibfolien 128
Schubmodul 84, 270
Schubmodulkurve 86
Schuhsohlen 98
Schutzkleidung 95, 126
Schweißen 192
Schwiegermutterseide 16
Schwindung 88, 177, 200
Schwingspielzahl 43
Seiten- und Heckscheiben 130
Sekundärrohstoffe 222
selbstverstärkende teilkristalline
 Polymere 138
Shrilk 156
Siegelzeit 174
Silikonkautschuk 95
Sintern 55
smoked sheets 8
Sockelleisten 118
Solvolyse 229, 232
Spannungs-Dehnungs-Kurve 30
Spannungsrisskorrosion 51f., 267
Spezialkunststoffe 111, 139
Sportgeräte 100, 126
Sportschuhe 149
Spritzgießen 93, 173
Spritzgussartikel (siehe Formteile) 129
Spritzgussverfahren 88
Spritzprägen 179
Spritzstreckblasformen 182
Sprödbrüche 35
Stabilisatoren 115, 165

- Standardthermoplaste 110
 Stangen 127
 Stegplatten 127
 Stoßfänger 125
 Straßenleitpfähle 118
 Streckblasen 182
 Streckdehnung 34
 Streckgrenze 34, 271
 Streckspannung 34
 Strukturbauten 124f.
 Strukturbauten für Fahrzeuge 100, 125
 Strukturformel 71
 Styrenics 119
 Styrol-Acrylnitril-Kunststoff 120
 Styrol-Butadien-Kautschuk 13, 21, 120
 Styrol-Butadien-Styrol-Block-copolymeren 143
 Styroloxit 20
 Styropor® 23
 Summenformel 71
 Surrogate 5
 syndiotaktisch 76
 synergetische Effekte 51, 78
 Synthesegas 233
 synthetische Kraftstoffe 234
- T**
- technische Dehngrenze 35
 technische Gummiwaren 96
 technische Thermoplaste 110, 114
 teilkristalline Thermoplaste 27, 87
 Tempern 177, 188
 The Ocean Cleanup 215
 thermische Kennwerte 202
 thermische Leitfähigkeit 69
 thermisches Recycling 229, 235
 Thermoplastabfälle 223
 Thermoplaste 27, 36, 80, 87, 103
 Thermoplastische Elastomere 80, 97, 110, 140, 144f., 147f.
 Trägermaterial für fotografische Filme und Magnetbänder 128
 Tragetaschen 150
 Trag- und Spannseile 126
- Tramp Elements 216
 Treibmittel 93, 119, 168, 187
 Trocknung 172
- U**
- UL 94 203
 Ultraschallschweißen 193
 Umformen 189
 ungesättigt 72
 Urformen 173
 UV-Absorber 94, 166
- V**
- Valenzelektronen 69
 Ventilsitze 137
 Verarbeitung 54, 171
 Verarbeitungshilfsmittel 93
 Verarbeitungstemperaturen 86
 Verbundwerkstoffe 1, 93
 verchromte Kunststoffteile 121
 Veredelung 197
 Vergilbung 54
 Vergussmasse 114
 Verklebungen für Luft- und Raumfahrt 100
 Verkleidungen 100
 vernetztes Polyethylen 113
 Vernetzung 41, 85, 90
 Vernetzungsdichte, Vernetzungsgrad 27, 272
 Verpackungen 113f., 127f., 151
 Verpackungen für Lebensmittel 119
 Verpackungsfolien 114
 Verpackungsgesetz 225
 Verscheibungen 130
 Verschleiß 42
 Verwertungsrate 220
 verzweigte Polymere 75
 Vibrationsschweißen 193
 Vicat-Erweichungstemperatur 203
 Vinylchlorid 73
 Viscose 17
 Viskosität 200, 272

Vulkanisation 9, 91
Vulkanisationsbeschleuniger 12, 92

W

Walzenbeläge 96
Wärmeausdehnungskoeffizient 273
Wärmeausdehnung und Wärmeleitfähigkeit 47
Wärmebehandlung 55
Wärmeformbeständigkeit 274
Wärmeleitfähigkeit 274
Warmformen 189
Waschbecken 127
Wasserstoffbrückenbindungen 123, 141, 273
Waste Electric and Electronic Equipment 223
Weichmacher 93, 115
Weichschaum 100
Weißbruch 116
Wellenmechanik 68
Weltproduktion 64

Werkstoffe 1
werkstoffliches Recycling 223
Wirbelsintern 186
World Plastics Council 214

X

Xylonit 15
Yellow Cards 274
Yellowness Index 274

Z

Zahnräder 125, 128, 132, 137, 144f.
Zahnriemen 96
Zellglas 16
Zero Pellet Loss 214
Zero Plastics to the Oceans 213
Zugfestigkeit 275
Zugmodul (siehe Elastizitätsmodul) 102
Zugversuch 201
Zuschlagstoffe 82

Namensregister

- Audemars, Georges 16
 Baekeland, Leo Hendrik 18
 Baumann, E. 20
 Bayer, Otto 22
 Beadle, Clayton 17
 Bernigaud, Hilaire Graf von Chardonnet de Grange 16
 Berthelot, Marcelin Pierre Eugène 19
 Berzelius, Jöns Jakob 19, 67
 Bevan, John 17
 Blyth, J. 20
 Bock, Walter 13
 Bohr, Niels 68
 Bouchardat 11
 Brandenberger, Jaques E. 16
 Buchholz, Karl 23
 Carothers, Wallace Hume 13, 22f.
 Castan, Pierre 19
 Charles, Jacques Alexandre César 8
 Condamine, Charles-Marie de La 7
 Cross, Charles Frederick 16
 Cross, Robert MacKenzie 10
 Dalton, John 67
 Delbrück, K. 12
 Demokrit 67
 Dickson, J. T. 23
 Dirac, Paul Adrien 68
 Droste, W. 22
 Dunlop, John Boyd 10
 Eastman, George 15
 Eichengrün, Arthur 16
 Einhorn, A. 18, 23
 Einstein, Albert 68
 Ellis, C. 19
 Empedokles 67
 Escales, Richard 19
 Faraday, Michael 11, 19
 Fawcett, Eric William 21
 Ford, Henry 12
 Fox, D. W. 23
 Freiherr Drais von Sauerbronn, Karl Friedrich Christian Ludwig 8
 Fresneau, C. F. 7
 Gäth, Rudolf 23
 Gibson, Reginald Oswald 21
 Goldschmidt, C. 18
 Goodyear, Charles Nelson 9
 Gottlob, K. 12
 Hamburger, A. 18
 Hancock, Thomas 9
 Harries, Carl Dietrich 11
 Hayward, E. 9
 Henrich, W. 18
 Hérrisant, L. A. M. 8
 Höchtlen, A. 22
 Hofmann, A. W. 20
 Hofmann, Fritz 12
 Hölzer, K. 18
 Hyatt, John Wesley und Isaiah 15
 John, Hanns 18
 Klatte, Fritz 20
 Kleiner, Helmut 13
 Köhler, R. 18
 Kolumbus, Christoph 7
 Kondakov, J. 12
 Konrad, Erich 13
 Krische, Wilhelm 15
 Lavoisier, Antoine Laurent 5, 67
 Leukipp 67
 Lüdersdorf, F. 9
 Macintosh, Charles 8
 Macquer, Pierre-Joseph 8
 Mark, Hermann 20
 Matthews, F. E. 12
 Mendelejew, Dimitri 67
 Meyer, Carl Heinrich 18
 Meyer, Kurt Hans 20
 Meyer, Lothar 67
 Michelin, Édouard und André 10
 Nairne, Edward 8
 Natta, Giulio 23
 Nieuwland, Julius Arthur 13
 Oswald, Walter und Wolfgang 12
 Parkes, Alexander 14
 Patton, I. G. 21
 Pauly, H. 16
 Persin, M. W. 21
 Pickles, Samuel 19

- Plunkett, Roy J. 22
Pollack, Fritz 18
Priestley, Joseph 8
Raschig, Fritz 18f.
Rebok, J. 22
Regnault, Henri Victor 20
Ritter, Adolf von Baeyer 17
Röhm, Otto 21
Scherer, O. 22
Schlack, Paul 22
Schloffer, F. 22
Schnell, Hermann 23
Schönbein, Christian Friedrich 14
Schrödinger, Erwin 68
Schützenberger, Paul 17
Schweizer, Ed. 16
Seidel, Wolfgang 13
Simon, Eduard 20
Spill, Daniel 15
Spitteler, Adolf 16
Stastny, Fritz 22
Staudinger, Hermann 6, 19, 21
Strange, E. H. 12
Swan, Joseph Wilson 16
Thomson, Robert William 10
Tilden, W. A. 11
Tollens, B. 18
Tschunkur, Eduard 13
Walton, Frederick Edward 15
Whinfield, J. R. 23
Wickham, Henry Alexander 10
Williams, E. G. 21
Williams, Greville 11, 19
Zacharias, E. 20
Ziegler, Karl 23