

# 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 Spitzenplatz 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 zgedachten 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. Außerem 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

<b>Der Autor</b> .....	VII
<b>Vorwort zur 4. Auflage</b> .....	IX
<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	XI
<b>1 Natürliche und synthetische Werkstoffe</b> .....	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

<b>2</b>	<b>Polymere Werkstoffe</b> .....	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
<b>3</b>	<b>Thermoplaste</b> .....	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
<b>4 Kunststoffadditive .....</b>	<b>161</b>
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
<b>5 Die Verarbeitung von Thermoplasten .....</b>	<b>171</b>
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
<b>6</b>	<b>Kennwerte von Thermoplasten .....</b>	<b>199</b>
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
<b>7</b>	<b>Kunststoffe und Umwelt .....</b>	<b>207</b>
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
7.4.4.5	Elastomere und Duroplaste .....	229
7.4.4.6	Gemischte Kunststoffabfälle .....	230
7.4.4.7	Chemisches Recycling .....	232
7.4.4.8	Zusammenfassung .....	234
7.5	Fazit .....	236
<b>8</b>	<b>Übersichtstabellen .....</b>	<b>243</b>
<b>9</b>	<b>Glossar .....</b>	<b>261</b>
<b>10</b>	<b>Weiterführende Literatur .....</b>	<b>277</b>
<b>Index</b>	<b>.....</b>	<b>279</b>

# 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

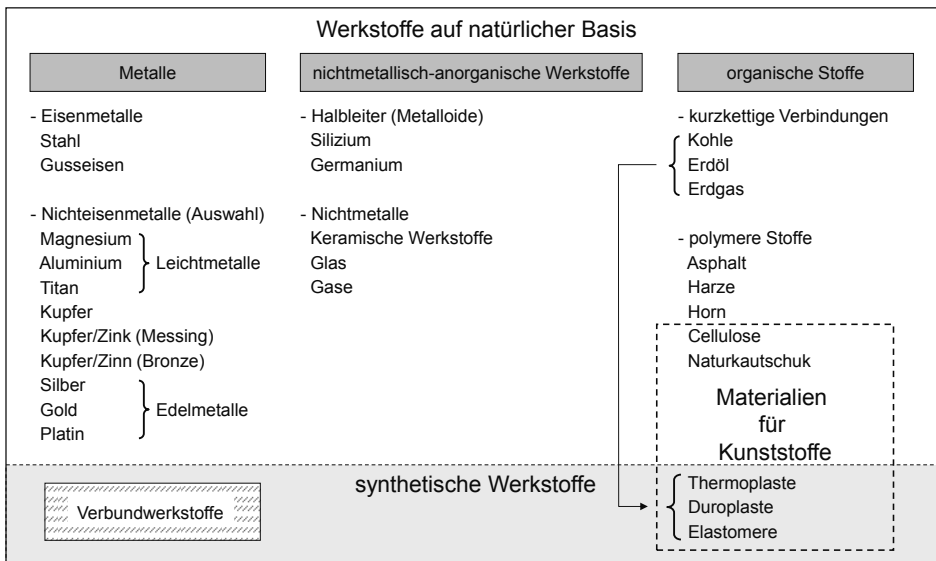
Nach Brockhaus sind Werkstoffe „alle Materialien mit technisch nutzbaren Eigenschaften (...). Der Zustand eines Werkstoffes wird durch seinen Aufbau und seine Eigenschaften charakterisiert (...). Der Aufbau eines Werkstoffes ergibt sich aus der chemischen Zusammensetzung (...). Entsprechend der technischen 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 Erdöldestillation, 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, Härten, 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  $2n^2$ . Auf der innersten Schale ( $n = 1$ ) 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**

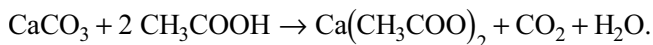
Auch durch die Überlappung von Elektronenhüllen benachbarter Atome kann die Edelgasstruktur erreicht werden. Hierzu bilden sich Elektronenpaare, wobei jedes Atom ein Elektron beisteuert. Durch die gemeinsame Anziehung der einzelnen Elektronen von beiden Atomkernen werden sie gewissermaßen auf diese Atome 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  $\text{H}_2\text{O}$  (Wasser), das demzufolge aus zwei Atomen Wasserstoff (H) und einem Atom Sauerstoff (O) aufgebaut ist,  $\text{NaCl}$  (Natriumchlorid, Kochsalz) aus je einem Atom Natrium (Na) und Chlor (Cl),  $\text{NaHCO}_3$  (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,  $\text{CaCO}_3$ ), mit Essigsäure ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ ) unter Bildung von Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ) 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:



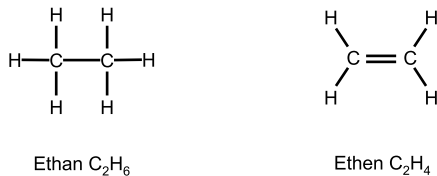
Das Calciumcarbonat zerfällt also in das zweiwertige Calciumion, das sich mit zwei Molekülen der einwertigen Essigsäure zu Calciumacetat verbindet, sowie in Kohlendioxid. Das noch verbleibende Sauerstoffatom aus dem Calciumcarbonat verbindet sich mit zwei Wasserstoffatomen, die von der Essigsäure freigesetzt 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,  $C_2H_5OH$ ) 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).



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

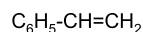
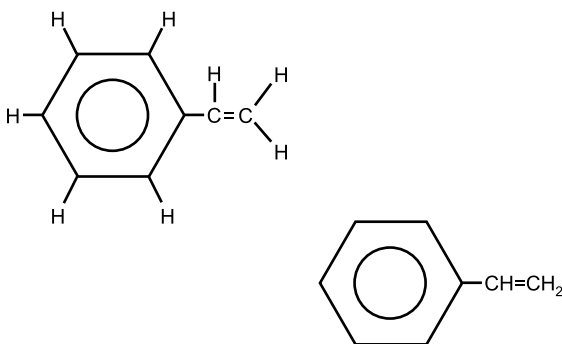
Charakteristisch für solche Doppelbindungen ist, dass ihre einzelnen chemischen Bindungen unterschiedliche Stabilität aufweisen, sich also eine davon relativ leicht öffnen lässt, um sich mit anderen Atomen zu verbinden. In der organischen Chemie ist dies meist wiederum Kohlenstoff. Aus diesem Grunde 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 vollkonjugierten 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



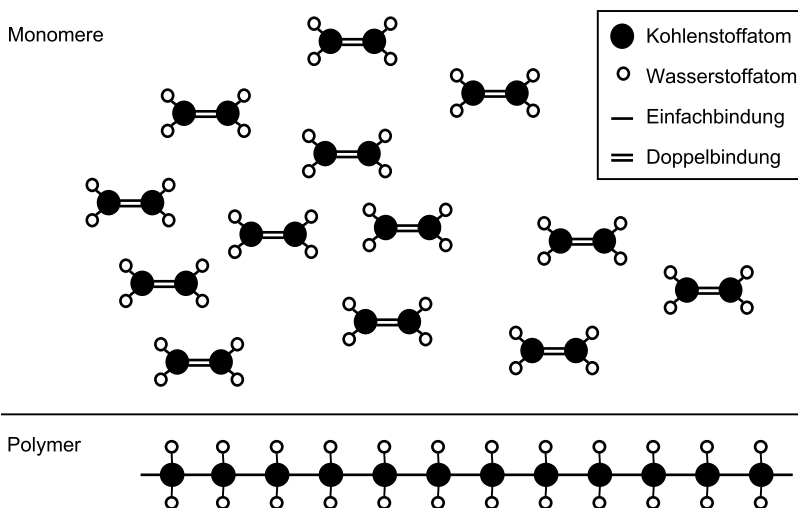
**Bild 2.2** Vereinfachte Schreibweise aromatischer Verbindungen am Beispiel Styrol

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 Klopfestigkeit 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.

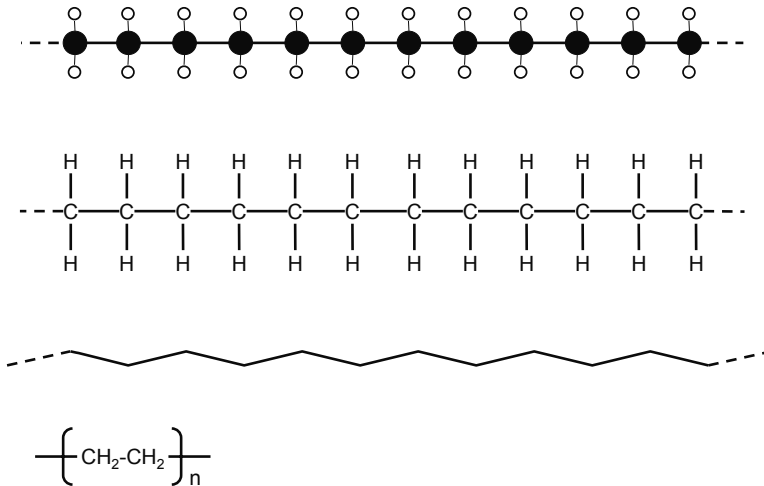
## ■ 2.2 Grundlagen polymerer Werkstoffe

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 gepfropft), 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 Initiator-moleküle, 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/m<sup>3</sup>; bei PE-HD zwischen 940 und 970 kg/m<sup>3</sup>.

Die niedrige Dichte der PE-LD-Typen resultiert aus dem hohen Anteil kurz- und langkettiger 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 Copolymere 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
- **chlorsulfoniertes Polyethylen (CSM):** kautschukelastisch, vernetzt für Kabelisolationen, beschichtete Gewebe, Dachfolien, Schlauchdecken und Schlauchboote
- **Ethylen-Vinylacetat-Copolymere (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-Copolymere (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-Copolymere (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 Synthefasern – 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 Synthefasern, 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/m<sup>3</sup>) 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 Dünge- und Pflanzenschutzmitteln, insbesondere bei großflächigem Anbau, sowie für Brennstoffe der Landmaschinen. Der CO<sub>2</sub>-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 ausreichen, 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 leichter 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
PEEKEK	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	Polyphenylsulfid
PPSU	Polyphenylsulfon
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 150 f., 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  
Altfahrzeug-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, 144 f., 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, 126 f., 129, 131, 133,  
  151, 182  
Blockcopolymerer 143  
Blu-ray Discs 129  
Bootsrümpfe 100

Brandverhalten 203  
 Brems- und Kupplungsteile 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  
 Cellophan 16  
 Celluloid 15  
 Celluloseacetat 16  
 Celluloseacetobutyrat 153  
 Celluloseacetopropionat 153  
 Cellulosehydrat 153  
 Chardonnnet-Seide 16  
 Charpy 202  
 ChemCycling 232  
 Chemikalienschläuche 95  
 chemische Beständigkeit 51, 250  
 chemische Bindungen 69  
 chemische Elemente 68  
 chemischer Apparatebau 118  
 Chlorhydrinkautschuke 96  
 chloriertes Polyethylen 113  
 Chloroprenkautschuk 22, 85, 94  
 chlorsulfoniertes Polyethylen 113  
 Circular Plastics Alliance 214  
 Coextrusionstechnik 182  
 Compact Discs (CD) 129  
 Copolymerisation 78  
 Cradle to Cradle 228  
 CreaSolv 231  
 Cryogenvverfahren 222  
 Cycloolefin-Copolymere 113

## D

Dachfolien 95  
 Dachmodule 130  
 Dämmmaterialien 100  
 Dämpfungselemente 146  
 Depolymerisation 232  
 Dichte 29  
 Dichtungen 95 f., 135, 137 f., 144, 146  
 Dielektrizitätszahl 204  
 Diffusion 54  
 Digital Versatility Discs (DVD) 129  
 Dithiocarbamate 12  
 Doppelbindung 72  
 Doppelbrechung 130  
 Druckverformungsrest 205  
 duktiles 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  
 Elektroisierfolien 128  
 Elektroisierlacke 126  
 Elektronen 68  
 Elektronengas 27, 69  
 Elektronenschale 69  
 elektrostatische Aufladung 49  
 Elektrotechnik 100, 121, 130, 134, 136 f.  
 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  
Flammschutzmittel 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  
Frikktion 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 Elektro-  
geräte 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, Glasübergangs-  
temperatur 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 Hochtemperatur-  
 kunststoffe 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 95 f., 98, 135, 144, 146, 149  
 Kalandrieren 185  
 Kaltschweißen 195  
 Käme 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  
 Lamine 100  
 Lampengehäuse 124  
 Laserschweißen 193  
 Latex 7  
 legieren 3  
 Leitrübe 49  
 Leuchtenabdeckungen 127  
 Lexan® 23  
 Lichtkuppeln 153  
 Lichtschutzmittel 166  
 Lichtwerbung 127, 153  
 lineare Polymere 75  
 Linoleum 15  
 Linsen 130  
 Löwenzahn 154  
 Luftschläuche für Reifen 95  
 Luft- und Raumfahrt 137

## M

Makrolon® 23  
 Makromoleküle ff 74  
 Marine-Litter 212, 220  
 Massenzahl 68  
 Massetemperatur 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  
 Nebervalenzkräfte 83, 267  
 Neoprene® 13  
 Neutronen 68  
 New Plastics Economy 214  
 Nieten 195  
 Nitrilkautschuk 121

Nitrocellulose 14  
Nitrolacke 16  
Nylon® 22

## O

Oberflächen- und Durchgangswiderstand 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-Fließbräte 200  
 Schmelze-Volumen-Fließbräte 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  
 Shrink 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  
 Sprödrübrüche 35  
 Stabilisatoren 115, 165

Standardthermoplaste 110  
 Stangen 127  
 Stegplatten 127  
 Stoßfänger 125  
 Straßenleitpfähle 118  
 Streckblasen 182  
 Streckdehnung 34  
 Streckgrenze 34, 271  
 Streckspannung 34  
 Strukturbauteile 124 f.  
 Strukturbauteile für Fahrzeuge 100, 125  
 Strukturformel 71  
 Styrenics 119  
 Styrol-Acrylnitril-Kunststoff 120  
 Styrol-Butadien-Kautschuk 13, 21, 120  
 Styrol-Butadien-Styrol-Block-  
 copolymere 143  
 Styroloxid 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, 144 f., 147 f.  
 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 Raum-  
 fahrt 100  
 Verkleidungen 100  
 vernetztes Polyethylen 113  
 Vernetzung 41, 85, 90  
 Vernetzungsdichte, Vernetzungs-  
 grad 27, 272  
 Verpackungen 113 f., 127 f., 151  
 Verpackungen für Lebensmittel 119  
 Verpackungsfolien 114  
 Verpackungsgesetz 225  
 Verschleibungen 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, 144 f.  
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  
 Hentrich, 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 18 f.  
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, Herrmann 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