

Georg Abts

# Kunststoff-Wissen für Einsteiger



3., aktualisierte und erweiterte Auflage

HANSER



Abts  
**Kunststoff-Wissen für Einsteiger**

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

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

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

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

***Kunststoffe.de***

Georg Abts

# **Kunststoff-Wissen für Einsteiger**

3., aktualisierte und erweiterte Auflage

HANSER

*Der Autor:*

Dipl.-Ing. Georg Abts

Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek:

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

ISBN: 978-3-446-45041-7

E-Book-ISBN: 978-3-446-45104-9

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

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

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

© Carl Hanser Verlag, München 2016

Herstellung: Jörg Strohbach

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

Coverrealisierung: Stephan Rönigk

Druck und Bindung: Hubert & Co GmbH, Göttingen

Printed in Germany



„Wer Kunststoff kennt, der nimmt Zement.“

*(Anonymus)*

# 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, 2007, 978-3-446-40940-8



# Vorwort

Einer aktuellen Studie zufolge sind Kunststoffe bei mehr als zwei Dritteln der deutschen Bevölkerung mit einem positiven Image belegt. Die Gründe dafür sind unter anderem die vielfältigen Gestaltungsmöglichkeiten und Einsatzbereiche moderner Kunststoffe, aber auch die durch Kunststoffe ermöglichte Gewichts- und Energieersparnis.

Dabei sind synthetische Polymerwerkstoffe im Vergleich zu Metallen und Keramik eine relativ junge Werkstoffklasse, die aufgrund ihrer maßgeschneiderten Eigenschaften mittlerweile 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. Somit haben sie 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, die für die heutige hoch industrialisierte Gesellschaft unverzichtbar geworden ist.

Allerdings trägt die zunehmende Belastung der Umwelt, insbesondere der Meere, mit Kunststoffabfällen immer mehr zu einem negativen Image der Kunststoffe bei. Daher ist es umso wichtiger, auf die positiven Eigenschaften der Kunststoffe aufmerksam zu machen, gleichzeitig aber auch ein Umdenken hinsichtlich der manchmal noch allzu großen Sorglosigkeit in Bezug auf Kunststoffabfälle anzuregen.

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, die jeweils einzeln 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. In der vorliegenden dritten Auflage werden erstmals auch Verbundwerkstoffe beschrieben, die insbesondere im Leichtbau eine immer größere Bedeutung gewinnen.

Ein weiteres Kapitel befasst sich mit den am meisten verbreiteten Verarbeitungsverfahren. Hier wird nun auch ein kurzer Abriss über die Möglichkeiten der additiven Fertigung gegeben. Außerdem werden einige Prüfverfahren und Werkstoffkenngrößen vorgestellt, um einen Bezug zu den in den Werkstoffbeschreibungen gegebenen Daten zu bieten.

Aufgrund der regen Entwicklungstätigkeit in diesem Bereich wurde das Kapitel der Biopolymere überarbeitet und ergänzt. Auf die Problematik der zunehmenden Umweltverschmutzung durch Kunststoffe, insbesondere des Marine Litter, wird ebenfalls eingegangen.

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.

April 2016, Georg Abts

# Inhaltsverzeichnis

<b>Der Autor</b> .....	VII
<b>Vorwort</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>	<b>65</b>
2.1	Chemische Grundlagen .....	65
2.2	Grundlagen polymerer Werkstoffe .....	72
2.3	Polymerisation, Polyaddition, Polykondensation .....	77
2.4	Arten polymerer Werkstoffe .....	78
2.4.1	Klassifizierung .....	78
2.4.2	Temperaturabhängige Charakteristik .....	81
2.4.3	Thermoplaste .....	85
2.4.4	Elastomere .....	88
2.4.5	Thermoplastische Elastomere .....	95
2.4.6	Duroplaste .....	96
2.4.7	Faserverstärkte Kunststoff-Verbundwerkstoffe (Composites) ....	99
<b>3</b>	<b>Thermoplaste .....</b>	<b>107</b>
3.1	Herstellung .....	107
3.2	Einteilung .....	108
3.3	Standardkunststoffe: Eigenschaften, Charakteristik, Anwendungen ....	110
3.3.1	Polyethylen (PE) .....	110
3.3.2	Polypropylen (PP) .....	112
3.3.3	Polyvinylchlorid (PVC) .....	113
3.3.4	Polystyrol (PS) .....	117
3.4	Technische Thermoplaste .....	118
3.4.1	Styrol-Acrylnitril-Kunststoff (SAN) .....	118
3.4.2	Acrylnitril-Butadien-Styrol-Kunststoff (ABS) .....	119
3.4.3	Acrylnitril-Styrol-Acrylat-Kunststoff (ASA) .....	120
3.4.4	Polyamide (PA) .....	120
3.4.5	Polymethylmethacrylat (PMMA) .....	124
3.4.6	Polyethylenterephthalat (PET) .....	125
3.4.7	Polybutylenterephthalat (PBT) .....	127
3.4.8	Polycarbonat (PC) .....	127
3.4.9	Polyoxymethylen (POM) .....	130
3.4.10	Polyphenylenether (PPE) .....	130
3.4.11	Polymerblends .....	131
3.4.12	Thermoplastische Elastomere (TPE) .....	132

3.5	Hochleistungskunststoffe .....	137
3.5.1	Fluorkunststoffe .....	137
3.5.2	Polyarylsulfone (PSU), Polyethersulfone (PES), Polyphenylensulfone (PPSU) .....	138
3.5.3	Polyphenylensulfid (PPS) .....	139
3.5.4	Polyaryletherketone (PAEK) .....	140
3.5.5	Polyimide (PI) .....	140
3.5.6	Selbstverstärkende teilkristalline Polymere (LCP) .....	141
3.6	Spezialkunststoffe .....	142
3.6.1	Elektrisch leitfähige Polymere .....	142
3.6.2	Biopolymere/Biokunststoffe .....	143
<b>4</b>	<b>Kunststoffadditive .....</b>	<b>155</b>
4.1	Füllstoffe .....	155
4.2	Faserwerkstoffe .....	156
4.3	Weichmacher .....	158
4.4	Flammschutzmittel .....	158
4.5	Stabilisatoren .....	159
4.6	Farbmittel .....	161
4.7	Weitere Additive .....	162
<b>5</b>	<b>Die Verarbeitung von Thermoplasten .....</b>	<b>165</b>
5.1	Aufbereiten .....	166
5.2	Urformen .....	167
5.2.1	Spritzgießen .....	167
5.2.2	Extrusion .....	173
5.2.3	Blasformen .....	176
5.2.4	Kalandrieren .....	178
5.2.5	Rotationsformen (Rotomolding) .....	179
5.2.6	Wirbelsintern .....	180
5.2.7	Schäumen .....	181
5.2.8	Tempern .....	182
5.2.9	Additive Fertigung .....	182
5.3	Umformen .....	183
5.4	Fügen .....	185
5.4.1	Schweißen .....	186
5.4.2	Kleben .....	188

5.4.3	Nieten	189
5.4.4	Schrauben	189
5.4.5	Schnappverbindungen	190
5.5	Veredelung	191
<b>6</b>	<b>Kennwerte von Thermoplasten</b>	<b>193</b>
6.1	Rheologische Eigenschaften	194
6.1.1	Schmelzindex (MVR, MFR), ISO 1133	194
6.1.2	Schwindung, ISO 294	194
6.2	Mechanische Eigenschaften	195
6.2.1	Zugversuch, ISO 527	195
6.2.2	Schlag- und Kerbschlagbiegeversuch, ISO 179 (Charpy)/ ISO 180 (Izod)	195
6.3	Thermische Kennwerte	196
6.4	Brandverhalten	197
6.5	Elektrische Prüfungen	198
6.6	Sonstige Kennwerte	198
6.6.1	Härte	198
6.6.2	Druckverformungsrest (ISO 815)	199
6.6.3	Dauerschwingversuch (DIN 53442)	199
<b>7</b>	<b>Kunststoffe und Umwelt</b>	<b>201</b>
<b>8</b>	<b>Übersichtstabellen</b>	<b>207</b>
<b>9</b>	<b>Glossar</b>	<b>225</b>
<b>10</b>	<b>Weiterführende Literatur</b>	<b>239</b>
	<b>Index</b>	<b>241</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

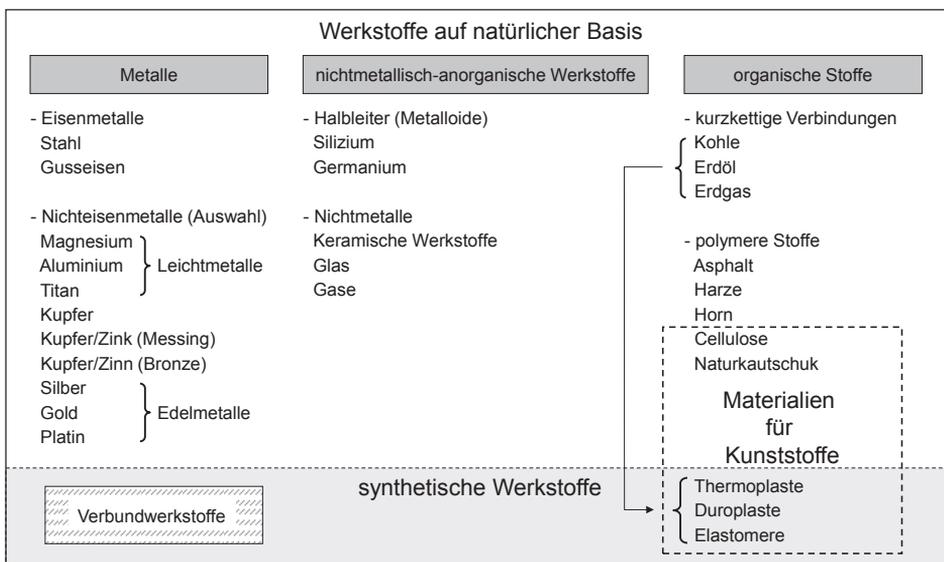
Nach Brockhaus sind Werkstoffe „alle Materialien mit technisch nutzbaren Eigenschaften (...). Der Zustand eines Werkstoffes wird durch seinen Aufbau und seine Eigenschaften charakterisiert (...). Der Aufbau eines Werkstoffes ergibt sich aus der chemischen Zusammensetzung (...). Entsprechend der technischen 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.

Jahrhundert A.D. nicht in der Lage, die zum Gießen erforderliche Temperatur zu erzeugen und musste Werkzeuge durch wiederholtes Erweichen und Hämmern (Schmieden) formen. Das seitdem hergestellte Gusseisen (das in China bereits seit 600 v. Chr. bekannt war) wurde erst ab etwa Mitte des 19. Jahrhunderts in den meisten Anwendungen mehr und mehr von Stahl verdrängt, nachdem neue Verfahren die zum Schmelzen des Eisens erforderlichen Temperaturen ermöglichten. Mit Gusseisen bezeichnet man Eisenlegierungen mit Kohlenstoffanteilen oberhalb von etwa 2%. Durch den gegenüber Stahl verringerten Schmelzpunkt kann es in einfachen Öfen geschmolzen und in Formen gegossen werden. Die meisten Gusseisensorten zeigen im Gegensatz zu Stahl ein sprödes Bruchverhalten, weisen jedoch eine höhere Verschleißfestigkeit auf. Dies wird auch heute noch im Maschinenbau ausgenutzt. Die Leichtmetalle Aluminium und Titan wurden bereits im Jahr 1825 erstmalig und stark verunreinigt gewonnen. Die industrielle Verwendung in hochreiner Form wurde jedoch erst ab 1854 (Aluminium) und 1938 (Titan) durch verbesserte Verfahren ermöglicht.

Als maßgeblicher Grund für die Suche nach neuen Werkstoffen kann zunächst – leider – die fortschreitende Entwicklung der Waffentechnik gelten. Man kann davon ausgehen, dass neue und bessere Materialien zunächst dem Militär und einer kleinen, begüterten Oberschicht zur Verfügung standen. Später fanden diese Werkstoffe auch zur Herstellung von Gebrauchsartikeln (Kochgeschirr, Schmuck) oder zur Verstärkung hölzerner Gegenstände Verwendung. Damit einher ging auch die Entwicklung geeigneter Verarbeitungsverfahren. So waren bereits in der Römerzeit klassische Schmiedetechniken wie Feuerschweißen und Härten bekannt.

Auch die Suche der Alchimisten nach dem Stein der Weisen und Versuche, Gold herzustellen, mögen ebenso wie aus Neugier durchgeführte Experimente zu neuen Werkstoffen geführt haben. Systematische Forschungen wurden jedoch erst mit der Einführung des Periodensystems und die durch den französischen Chemiker Antoine Laurent Lavoisier Ende des 18. Jahrhunderts beschriebenen Grundlagen ermöglicht. Durch die zunehmende Industrialisierung – insbesondere Westeuropas ab Ende des 18. Jahrhunderts – stieg der Bedarf an Rohstoffen kontinuierlich. Mit höherem Lebensstandard wuchs auch die Nachfrage nach hochwertigeren Kleidungsstücken oder Bedarfsgegenständen. Der rapide steigende Verbrauch an Naturfarben, Kautschuk oder Seide sowie an Luxusgütern wie Elfenbein, Schildpatt und Perlmutter ließ deren Preise beständig steigen. Gleichzeitig befand man sich in der Abhängigkeit der Erzeugerländer oder deren Kolonialherren. Sogar der in großen Mengen in Europa vorhandene Marmor war vor der Erfindung der Eisenbahn im 19. Jahrhundert aufgrund seines hohen Gewichts und dem dadurch bedingten kostspieligen Transport ein Luxusgut.

Die Suche nach entsprechenden Ersatzstoffen (Surrogate), zunächst durch Umwandlung von Naturprodukten, wurde daher zum maßgeblichen Treiber der neu entstandenen chemischen Industrie. Diese hatte sich ab etwa Mitte des 19. Jahr-



**Bild 1.2** Historische Entwicklung der Werkstoffe

hunderts überwiegend mit der Entwicklung von Farbstoffen befasst, um immer teurer werdende Naturprodukte (wie Indigo) zu ersetzen. Dabei bildeten zufällige Entdeckungen bei der Suche nach neuen Farbstoffen die Grundlagen der heutigen pharmazeutischen Chemie. Anfang des 20. Jahrhunderts begann außerdem die gezielte Entwicklung von Synthesekautschuken mit dem Ziel, den immer knapper und gleichzeitig teurer werdenden Naturkautschuk zu ersetzen. Thermoplaste und Duroplaste spielten bis in die ersten Jahrzehnte des zwanzigsten Jahrhunderts nur eine untergeordnete Rolle. Aufbau und Struktur polymerer Werkstoffe wurden erstmals 1920 durch Herrmann Staudinger erklärt. Seine Arbeiten wurden aber erst einige Jahre später nach Vorliegen entsprechender Röntgenstrukturuntersuchungen allgemein anerkannt, was die systematische Entwicklung neuer polymerer Werkstoffe erst ermöglichte. Die bis dahin entwickelten synthetischen Polymere basierten im Grunde genommen auf Vermutungen und experimentellen Erfahrungen. In einigen Fällen führte auch der Zufall zur Entwicklung neuer Polymere (Bild 1.2).

### **Polymere der Steinzeit – Natur pur?**

Natürliche Polymere, wie Asphalt und Bernstein, waren schon seit Jahrtausenden in Gebrauch. Im vorderen Orient wurde Asphalt bereits um 6.500 v. Chr. zum Straßenbau und zur Abdichtung von Gefäßen verwendet. Neuere archäologische Funde zeigten, dass bereits vor mindestens 80.000 Jahren eine thermoplastische Substanz gezielt hergestellt wurde, die damit als ältester Kunststoff der Welt bezeichnet werden kann. Aus der Rinde der Birke wurde durch einen anaeroben Verschweilungsprozess Birkenpech gewonnen, eine schwarze, schwach aromatisch riechende Substanz, die vielfältige Funktionen erfüllte. So wurden damit Pfeilspitzen aus Knochen oder Stein an den Schäften befestigt, aber auch Federn, die den Flug stabilisierten. Daher muss diese Substanz relativ dünnflüssig verarbeitet worden sein. Auch Feuersteine, die damals als Messerklingen fungierten, wurden mittels Birkenpech in Griffen aus Holz befestigt. Weiter liegen auch Hinweise über das Kleben zerbrochener keramischer Gefäße (etwa 5.090 v. Chr.) vor. Birkenpech wurde bis in die Römerzeit verwendet und später durch Holzteer abgelöst.

Aktuelle Versuche zeigten, dass die Herstellung offenbar eine gewisse Erfahrung voraussetzte. Es ist bis heute strittig, wie Birkenpech unter den damaligen Verhältnissen gewonnen wurde. Fest steht jedoch, dass Birkenpech bereits in der Steinzeit häufig verwendet wurde und anscheinend relativ leicht herzustellen war.

### **Gummi – Von Meuterern, Macs und Monopolen**

Der Entdecker Christoph Kolumbus und der Konquistador Hernán Cortez stießen während ihrer Reisen nach Südamerika (1495/1519) erstmals auf elastische Bälle, die bei den dortigen Einwohnern in Verwendung waren, maßen aber ihrer Entdeckung keine weitere Bedeutung bei. In Europa wurde das Interesse an Kautschuk im Jahr 1751 aufgrund von Berichten des Astronomen und Geographen Charles-Marie de La Condamine und des Ingenieurs C. F. Fresneau geweckt. Sie hatten sich mehrere Jahre zur Vermessung von Meridianen in Südamerika aufgehalten und dabei das Zapfen von Kautschukbäumen beobachtet. Aus der Rinde des später von Botanikern *Hevea brasiliensis* genannten Baumes gewannen die Einwohner eine weiße, klebrige Flüssigkeit, die ihnen ermöglichte, verschiedene wasserdichte Gebrauchsgegenstände herzustellen. Aufgrund der äußerlichen Ähnlichkeit zu Milch (lateinisch lac) prägte de La Condamine die Bezeichnung Latex für den Pflanzensaft, der bis zu 40% Kautschuk enthält. Die einheimische Bezeichnung caao-chu für weinender Baum wurde über das französische Wort caoutchouc zum heutigen Begriff Kautschuk. (In der Literatur finden sich auch weitere hiervon abweichende Schreibweisen.)

Der Verwendung dieses neuen Rohstoffs für die Herstellung wasserdichter Artikel wie Regenplanen oder Stiefel stand jedoch seine geringe Haltbarkeit entgegen. Der durch Zersetzungsprozesse der in Naturlatex enthaltenen Eiweiße entstehende Ge-

ruch brachte sicher nicht nur eine Schiffsbesatzung an den Rand einer Meuterei, bis man sich des unbrauchbar gewordenen Materials durch Entsorgung über Bord entledigen und damit auf einen potenziellen Gewinn verzichten musste.

Um dieses Problem zu umgehen, wurde der Latex schließlich unmittelbar nach seiner Gewinnung über offenem Feuer getrocknet. Der Rauch diente dabei auch als Konservierungsmittel. Dieses Verfahren wird auch heute noch in abgewandelter Form bei der Gewinnung von Naturkautschuk angewendet; die erhaltenen Felle nennt man *smoked sheets*. Der auf diese Weise erhaltene Kautschuk ließ sich zwar verschiffen, war aber für eine weitere Verarbeitung zu zäh. Somit waren Verarbeitung und Anwendung von Latex auf regionale Erzeugnisse beschränkt, oder man musste die zu beschichtenden Gegenstände auf die kostspielige und zeitaufwendige Reise nach Brasilien senden. Getreu der Devise „Wenn der Prophet nicht zum Berg kommt, dann muss der Berg zum Propheten kommen“ ließ beispielsweise der König von Portugal seine Reitstiefel nach Brasilien verschicken, um sie dort wasserfest beschichten zu lassen. Schließlich entdeckten die beiden Wissenschaftler Pierre-Joseph Macquer und L. A. M. Hérisant 1763 eine Methode, den zähen getrockneten Kautschuk durch Terpentin und Ether wieder löslich zu machen, was nun weitere Anwendungen auch im fernen Europa erschloss. Macquer bestrich Wachsformen mit solchen Kautschuklösungen und konnte (nach Verdunsten des Lösungsmittels) durch Abschmelzen des Wachses die ersten Formartikel wie Schläuche oder Schuhe herstellen. Allerdings waren die Eigenschaften dieser Kautschukerzeugnisse völlig unzureichend, da das Verfahren der Vulkanisation noch nicht bekannt war. Die Produkte waren in der Wärme klebrig und verbreiteten – hauptsächlich durch die bei der Verarbeitung verwendeten Lösungsmittel – besonders im Sommer immer noch einen starken Geruch. Im Winter verhärteten die Produkte durch die einsetzende Kristallisation des Kautschuks. Es war immerhin möglich, die Gasdurchlässigkeit von Textilien durch Kautschukbeschichtungen zu reduzieren. Der Physikprofessor Jacques Alexandre César Charles konstruierte aus mit Kautschuk beschichteter Seide 1783 den ersten Wasserstoffballon.

Der Mechaniker Edward Nairne entdeckte 1770 die Möglichkeit, fehlerhafte Bleistiftzeichnungen durch Reiben mit Kautschuk anstelle des bisher benutzten Brotes zu korrigieren. Dieser Effekt wurde vom Chemiker Joseph Priestley veröffentlicht, der daher für lange Zeit auch als der Erfinder des Radiergummis galt. Nairne vermarktete seine Radierer unter dem Namen *Indian Rubber*, das Wort *rubber* (reiben) wird im englischen Sprachgebrauch heute sowohl für unvulkanisierten Kautschuk als auch für Gummi verwendet. Weitere frühe Einsatzgebiete für Naturkautschuk waren elastische Bänder für Hosenträger und Strumpfbänder (1803), Bezüge für Laufräder (Karl Friedrich Christian Ludwig Freiherr Drais von Sauerbronn, 1818) sowie Regenmäntel.

Charles Macintosh umging das Problem der hohen Klebrigkeit durch das erste Sandwichverfahren: ein mit in Benzol gelöstem Kautschuk bestrichenes Baumwoll-

gewebe wurde mit einer zweiten Gewebelage abgedeckt (1823). Allerdings waren auch diese Regenmäntel im Winter immer noch sehr steif und unhandlich und das Problem der Geruchsentwicklung in der Wärme war ebenfalls noch nicht gelöst. Der Name Macintosh prägte aber immerhin den noch heute in der englischen Umgangssprache gebräuchlichen Begriff Mac für Regenmäntel.

Der Siegeszug des Gummis wurde schließlich durch die Entdeckung der Vulkanisation eingeläutet. Die Vulkanisation stellt gleichzeitig die erste chemische Umwandlung eines Naturstoffs durch Zusatz von Chemikalien dar.

Der Ursprung dieser zentralen Entdeckung für die gesamte Kautschuktechnologie beruhte interessanterweise auf Überlegungen zur Verbesserung der Verfahrenstechnik. Nach wie vor bestand das Problem, dass getrockneter Kautschuk äußerst schwierig zu verarbeiten war. Mit Lösungsmitteln behandelter Kautschuk wies dagegen eine hohe Klebrigkeit auf. Thomas Hancock hatte 1824 beobachtet, dass man Kautschukstücke durch Verpressen miteinander verbinden konnte. Mit einer von ihm konstruierten Maschine, dem sogenannten Masticator, sollte der zähe Kautschuk daher zerkleinert werden, um leichter zu verarbeitende Stücke zu erhalten. Es stellte sich jedoch heraus, dass durch die mechanische Bearbeitung die Klebrigkeit noch weiter zunahm. (Ursache ist die Spaltung der Polymerketten durch mechanische Energie, wodurch die Viskosität verringert wird. Dieser Mastikation genannte Prozess ist auch heute noch bei Naturkautschuk üblich, da seine Viskosität naturgegeben ist. Bei den in mehreren Viskositätsstufen verfügbaren Synthetikautschuken entfällt die Mastikation. Die in diesen Produkten enthaltenen Stabilisatoren verhindern außerdem weitgehend Kettenspaltungen bei der Verarbeitung, sie lassen sich also kaum mastizieren.) Man versuchte nun, die Klebrigkeit durch Puderung zu kompensieren, ein damals übliches Pudermittel war Schwefel. 1832 beobachtete F. Lüdersdorf erstmals Wechselwirkungen zwischen Schwefel und Kautschuk. E. Hayward bemerkte 1838, dass die Oberfläche von mit Schwefel gepudertem Naturkautschuk durch Solarisation, also unter Einwirkung von Sonnenlicht, verhärtete, allerdings auf Kosten der Haltbarkeit.

Der amerikanische Erfinder Charles Nelson Goodyear erwarb schließlich von Hayward das entsprechende Patent, erkannte aber ebenso zunächst nicht die Konsequenzen dieser Beobachtung. Versuche, Schwefel mit Terpentin in den Kautschuk einzuarbeiten, scheiterten. Goodyear, der in dieser Zeit oft in bitterer Armut lebte, arbeitete wie besessen daran, die hohe Klebrigkeit des Kautschuks zu eliminieren und haltbare Produkte herzustellen. Er hatte inzwischen erkannt, dass Bleiweiß (basisches Bleioxid, heute üblicherweise durch Zinkoxid ersetzt) die Reaktion des Kautschuks mit Schwefel aktivierte, und dass diese Reaktion durch Wärme begünstigt wurde. Schließlich stellte er 1839 fest, dass durch Erhitzen einer Mischung aus Kautschuk, Schwefel und Bleiweiß die Klebrigkeit der Probe deutlich reduziert worden war, dafür wies sie eine höhere Elastizität als der unbehandelte Naturkautschuk auf. Der klassischen Beschreibung nach soll bei diesen Versuchen

eine Mischung aus Kautschuk und Schwefel auf eine heiße Herdplatte gefallen sein. Meistens wird Bleiweiß nicht erwähnt. Allerdings wäre unter diesen Bedingungen die Reaktionszeit für eine vollständige Vernetzung aufgrund der schlechten Wärmeleitfähigkeit des Kautschuks viel zu lang. Goodyear, der kaum genügend Finanzmittel zum Einkauf des teuren Rohstoffs hatte, würde außerdem versucht haben, eine auf die Herdplatte gefallene Probe zügig zu entfernen, denn bei längerer Verweilzeit auf der feuerbeheizten Herdplatte würde Naturkautschuk aufgrund thermischer Überbelastung zunächst erweichen und sich schließlich zersetzen. (Eine Anekdote erzählt, er habe diese Mischung vor seiner Ehefrau sogar im Ofen versteckt.)

Möglicherweise hatte Goodyear versucht, durch moderates Erwärmen, etwa, indem er die Probe in einem gewissen Abstand zur Herdplatte hielt, die Reaktion zwischen Kautschuk, Bleiweiß und Schwefel einzuleiten und damit zumindest eine partielle Vernetzung erzielt. Dieses Phänomen wird in der Kautschukindustrie als Anvulkanisation bezeichnet. Die Klebrigkeit wird hierdurch bereits merklich verringert, die Probe nimmt mehr und mehr gummielastischen Charakter an. Goodyear zog daraus vermutlich die richtigen Schlüsse. Es bedurfte jedoch noch einer Reihe weiterer Experimente, bis Goodyear endlich die für eine vollständige Vernetzung erforderlichen Parameter kannte, um aus dem klebrigen Kautschuk elastischen Gummi herzustellen. Aufgrund der dazu erforderlichen hohen Temperaturen prägte Goodyear den Begriff Vulkanisation. Nun war die Herstellung wesentlich leistungsfähigerer Produkte möglich, die nicht mehr die Nachteile unvulkanisierter Kautschuks aufwiesen. Die ursprüngliche Klebrigkeit war praktisch nicht mehr vorhanden, die Kristallisation in der Kälte deutlich verzögert, dafür waren die Produkte nun jedoch hochelastisch.

Im Jahr 1845 wurde von Robert William Thomson bereits der erste Luftreifen zum Patent angemeldet. Diese Erfindung war jedoch – mangels Fahrzeugen – noch ihrer Zeit weit voraus. Der irische Tierarzt John Boyd Dunlop erfand 1888, zwei Jahre nachdem Benz und Daimler unabhängig voneinander die ersten Motorfahrzeuge konstruiert hatten, einen Luftreifen für das Fahrrad seines Sohnes. Dunlop konnte sich den Reifen nochmals patentieren lassen, da Thomson sich seine Erfindung als elastischen Riemen hatte eintragen lassen. Bis 1894 entwickelten die Gebrüder Édouard und André Michelin, die sich bisher mit der Fabrikation von landwirtschaftlichen Maschinen beschäftigt hatten, den ersten mit vertretbarem Aufwand demontierbaren Autoreifen. Den Anstoß für diese Entwicklung gab ein Radfahrer, der bei den Gebrüdern Michelin, die bereits mit den Vorteilen von vulkanisiertem Kautschuk vertraut waren, nach Hilfsmitteln für eine Reifenreparatur fragte.

Der einsetzende Siegeszug des Gummis führte zu einem erheblichen Preisanstieg seitens des Haupterzeugerlandes Brasilien; der Preis überstieg zeitweilig (1860) sogar den von Silber. Obwohl die Ausfuhr von Samen oder Setzlingen der *Hevea brasiliensis* bei Todesstrafe verboten war, gelang es dem Abenteurer Henry Wick-

ham im Jahr 1876 etwa 70.000 der immerhin bis zu 3,5 Zentimeter durchmessenden Samen aus Brasilien nach England zu schmuggeln, wovon jedoch aufgrund der unzureichenden klimatischen Bedingungen nur etwa 2.400 aufgingen. Auch dem Botaniker Robert Cross, der für den Fall des Scheiterns von Wickham nach Brasilien gesandt wurde, gelang es, im gleichen Jahr nochmals etwa 1.000 Samen aus Brasilien zu schmuggeln, diese gingen jedoch sämtlich ein. Von den verbliebenen Setzlingen wurden etwa 1900 nach Ceylon (dem heutigen Sri Lanka) verschifft. Im Jahr 1880 zählte man noch etwa 400 lebende Pflanzen. Etwa 50 Samen gingen nach Indien und 22 nach Singapur. Letztere bildeten den Grundstock für ca. 75% der heutigen Kautschukplantagen in Malaysia, das heute nach Thailand und Indonesien der drittgrößte Produzent von Naturkautschuk ist. Da zwei Baumgenerationen erforderlich waren, bis genügend Samen für eine systematische Plantagenwirtschaft zur Verfügung standen, und man die Bäume erst nach sieben Jahren anzapfen konnte, dauerte es noch etwa 20 Jahre, bis die Plantagen in Südostasien zu einer ernsthaften Konkurrenz für Brasiliens Wildkautschuk herangewachsen waren.

Mit der einsetzenden Motorisierung Anfang des zwanzigsten Jahrhunderts stieg der Bedarf an Naturkautschuk insbesondere für die Herstellung von Luftreifen, aber auch für Schläuche und Riemen enorm an. Lag der Weltkautschukverbrauch 1890 noch bei 2.300 Tonnen, hatte er zehn Jahre später bereits ca. 50.000 Tonnen erreicht. Der brasilianische Wildkautschuk konnte diesen Bedarf langfristig nicht decken, gleichzeitig suchte man nach einem Weg, sich aus der Abhängigkeit des nun in den britischen Kolonien gezüchteten Plantagenkautschuks zu befreien. Dessen Preis hatte mittlerweile eine Schwindel erregende Höhe erreicht. Eine Möglichkeit bestand im Strecken mit billigen anorganischen Füllstoffen wie etwa Kreide oder Ruß. Damit konnte man den steigenden Kautschukpreis zumindest teilweise kompensieren, ohne die elastischen Eigenschaften allzu sehr zu verringern. Anfang des zwanzigsten Jahrhunderts wurde schließlich der verstärkende Effekt von speziellen Rußen, aber auch Kieselsäuren (Silica) gefunden. Durch dosierte Zugabe solcher verstärkenden Füllstoffe ließen sich nun mechanische Eigenschaften wie etwa Zugfestigkeit oder Härte sogar gegenüber ungefüllten Naturkautschuk-Vulkanisaten deutlich erhöhen.

Die chemische Industrie strebte nun danach, durch synthetische Ersatzprodukte eine möglichst vollständige Unabhängigkeit von Naturkautschuk zu erreichen. Allerdings waren auch Ende des 19. Jahrhunderts nähere Einzelheiten zur Polymerstruktur von Naturkautschuk nicht bekannt. Michael Faraday erkannte 1826, dass Naturkautschuk ein Kohlenwasserstoff ist, dessen Kohlenstoff und Wasserstoffatome im Verhältnis 5:8 vorliegen. Greville Williams isolierte im Jahr 1860 diesen Kohlenwasserstoff durch trockene Destillation (Pyrolyse) aus Naturkautschuk und nannte ihn Isopren. Das auf diese Weise gewonnene Isopren wurde 1876 durch Gustave Bouchardat in einem mehrmonatigen Prozess in eine kautschukähnliche