

# HANSER



Leseprobe

Georg Abts

Kunststoff-Wissen für Einsteiger

ISBN (Buch): 978-3-446-45041-7

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

Weitere Informationen oder Bestellungen unter

<http://www.hanser-fachbuch.de/978-3-446-45041-7>

sowie im Buchhandel.

# 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 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 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 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 Kunststoffe und Umwelt .....</b>	<b>201</b>
<b>8 Übersichtstabellen .....</b>	<b>207</b>
<b>9 Glossar .....</b>	<b>225</b>
<b>10 Weiterführende Literatur .....</b>	<b>239</b>
<b>Index .....</b>	<b>241</b>

# 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 zugesetzten 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

# 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

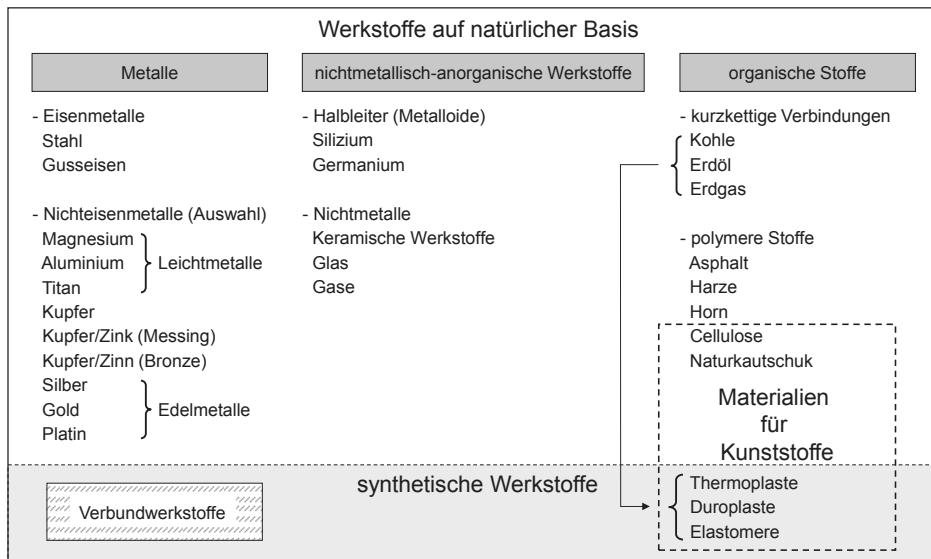
Nach Brockhaus sind Werkstoffe „alle Materialien mit technisch nutzbaren Eigenschaften (...). Der Zustand eines Werkstoffes wird durch seinen Aufbau und seine Eigenschaften charakterisiert (...). Der Aufbau eines Werkstoffes ergibt sich aus der chemischen Zusammensetzung (...). Entsprechend der technischen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

**Tabelle 1.3** Historische Entwicklung der synthetischen Werkstoffe (Auswahl) (Fortsetzung)

1969:	Thermoplastisches Polyurethan (TPE-U)
1971:	Polyphenylensulfid
1974:	Elektrisch leitfähiger Polyacetalfilm (H. Shirakawa, A. G. Diarmid, A. J. Heeger)
1975:	Polynorbornenkautschuk
1976:	Polymerblend aus Polycarbonat und Acrylnitril-Butadien-Styrol
1978:	Ethylen-Acrylatkautschuk
1979:	Polyetheretherketon, thermoplastische Elastomere auf Basis von Verschnitten aus vernetztem Ethylen-Propylen-Kautschuk und Polyolefinen (TPE-O), hydrierter Nitrilkautschuk
1981:	Polytetrafluorethylen-Polyolefin-Blends
1982:	Polyetherimid
1987:	Thermoplastische Polyether-Polyamid-Block-Copolymeren (TPE-A)
1988:	Flüssigkristalline Polymere
1989:	Copolymer aus Ethylen und chlorsulfonierte Polyethylen
1990:	Licht-emittierende Polymere auf Basis von Poly- <i>p</i> -Phenylenvinylen (R. H. Friend, A. B. Holmes)

## ■ 1.3 Abgrenzung der Kunststoffe von Metallen und keramischen Werkstoffen

Aufgrund ihrer deutlich geringeren Dichte und der Möglichkeit, auch Teile mit komplizierter Geometrie in einem Arbeitsgang und relativ preiswert herzustellen, haben Kunststoffe in vielen Anwendungen Metalle ersetzt. Allerdings sind dabei grundlegende Unterschiede zwischen den verschiedenen Werkstoffen zu berücksichtigen. Kunststoffe besitzen eine deutlich geringere Steifigkeit und Festigkeit als Metalle, was nicht in allen Fällen durch entsprechende Formteilgestaltung ausgeglichen werden kann. Aufgrund ihrer besonderen Molekularstruktur kriechen Kunststoffe bei fortwährender Belastung, was sie erheblich von Metallen und keramischen Werkstoffen unterscheidet. Bei dynamischer Beanspruchung erlauben Keramiken und Metalle weit höhere Kräfte und Frequenzen, aber geringere Auslenkungen als Kunststoffe, von denen wiederum Elastomere die größte dynamische Beständigkeit aufweisen.

Im Gegensatz zur Schmelztemperatur von Metallen oder keramischen Werkstoffen liegt die Glastemperatur von Kunststoffen viel näher an ihrer Gebrauchstemperatur, was deutliche Einflüsse auf Elastizitätsmodul und Festigkeit hat. Auch hinsichtlich elektrischer Leitfähigkeit und Wärmeleitfähigkeit unterscheiden sich Kunststoffe meist deutlich von anderen Werkstoffen.

### 1.3.1 Aufbau

Kunststoffe bestehen aus polymerisierten Kohlenwasserstoffen, also zum größten Teil aus den chemischen Elementen Kohlenstoff und Wasserstoff. Die Makromoleküle der Kunststoffe liegen nebeneinander mehr oder weniger verknüpft vor und sind untereinander entweder nicht vernetzt (Thermoplaste), schwach vernetzt (Elastomere) oder stark vernetzt (Duroplaste). Als Modellbeispiel kann hier ein Knäuel aus langen Schnüren dienen. Solange diese nicht miteinander verbunden sind, kann man einzelne Schnüren relativ problemlos gegeneinander bewegen oder aus dem Knäuel herausziehen (Thermoplaste). Feste Gegenstände lassen sich relativ leicht durch dieses Knäuel durchdrücken, da die einzelnen Schnüren sich leicht gegeneinander verschieben lassen. Werden die Schnüren an einigen wenigen Stellen miteinander verknotet, lassen sie sich zwar nicht mehr einzeln trennen, jedoch lässt sich das Knäuel insgesamt noch in Grenzen, die durch die Anzahl der Verknotungen bestimmt werden, strecken (Elastomere). Auch feste Gegenstände lassen sich noch mit einiger Kraft durch die meisten der durch die Knoten gebildeten Maschen hindurchdrücken. Sind aber die Schnüren in dichten Abständen miteinander verknotet, kann das hierdurch gebildete engmaschige Netz nur noch als Ganzes bewegt werden (Duroplaste). Feste Gegenstände vermögen es nicht mehr zu durchdringen.

Bei Thermoplasten unterscheidet man zwischen solchen mit völlig ungeordneten Strukturen (amorphe Thermoplaste; amorph = gestaltlos) und solchen mit teilweise parallel angeordneten Makromolekülen (teilkristalline Thermoplaste). Die hier auftretenden starken physikalischen Wechselwirkungen tragen zur Versteifung bei. Teilkristalline Thermoplaste schmelzen daher erst nach Überschreiten der Kristallit-Schmelztemperatur, bei der sich die parallelen Stränge voneinander lösen. Amorphe Polymere schmelzen dagegen bereits bei Erreichen ihrer Glasübergangstemperatur.

Da die Makromoleküle von Thermoplasten und Elastomeren verknüpft vorliegen, lassen sie sich bei Zugbelastung leichter und deutlich weiter dehnen als die kristallin aufgebauten Metalle. Die Polymerketten gleiten relativ leicht voneinander ab, wodurch plastische Verformung auftritt. Dabei wird die Beweglichkeit der Makromoleküle durch die Vernetzungsdichte (Anzahl an vernetzten Monomerbausteinen bezogen auf ihre gesamte Anzahl) und den Kristallisationsgrad (Anteil an kristallinen Bereichen) bestimmt. Die dicht vernetzten Duroplaste verhalten sich hier ähnlich wie keramische Werkstoffe und lassen sich nicht merklich dehnen.

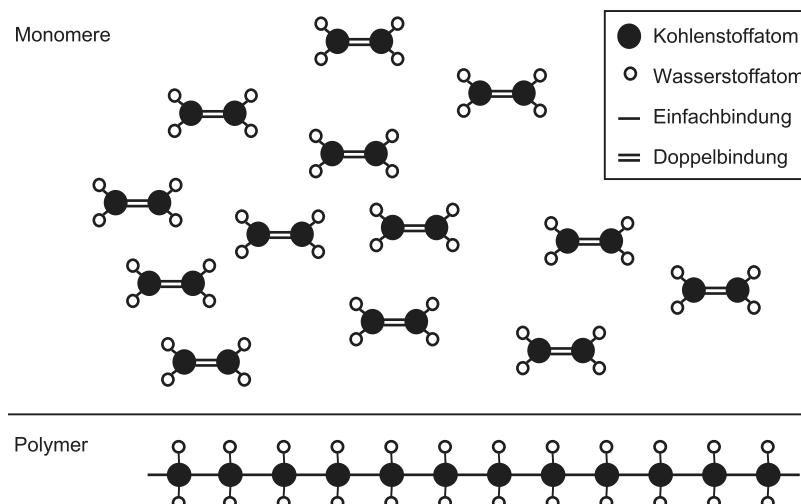
Metalle besitzen eine Gitterstruktur aus dicht gepackten Metallatomen. Ihre Elektronen sind nicht vollständig an die Atomkerne gebunden, sondern vermögen sich im gesamten Gitter zu bewegen. Man spricht hier auch von einem Elektronengas. Es verleiht den Atomkernen eine gewisse Bewegungsfreiheit bei mechanischer Beanspruchung, was die plastische Verformung von Metallen erst ermöglicht. Gleich-

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

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

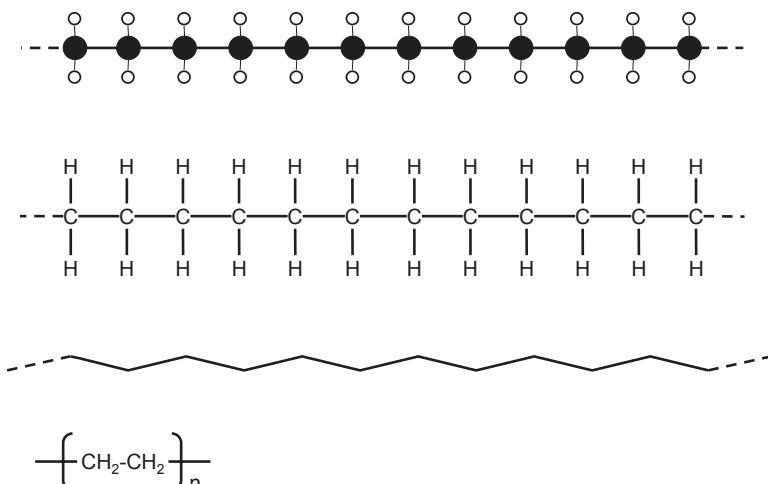
## ■ 2.2 Grundlagen polymerer Werkstoffe

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



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

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

### 3.3.2 Polypropylen (PP)

Polypropylen ist mit rund 20 % Anteil an der Gesamtproduktion der zweitwichtigste Kunststoff. Obwohl Polypropylen dem PE chemisch relativ ähnlich ist, ist es deutlich härter, fester und thermisch höher belastbar. Die maximale Dauereinsatztemperatur liegt bei etwa 100 °C. Unter 0 °C steigt jedoch die Schlagempfindlichkeit stärker an als bei PE. Spezialtypen ermöglichen sowohl höhere als auch niedrigere Einsatztemperaturen. Durch Wahl der Polymerisationsbedingungen lassen sich neben isotaktischen und syndiotaktischen auch ataktische Polymerivate erhalten. Dies ermöglicht eine große Vielfalt verfügbarer Typen.

Die meisten Polypropylen-Typen sind isotaktisch aufgebaut. Der gleichmäßige Aufbau ist Ursache für den hohen Kristallisationsgrad und damit für die gegenüber PE-HD größere Festigkeit und Steifigkeit sowie die höheren Schmelz- und Gebrauchstemperaturbereiche. Die Methyl-Seitengruppen verhindern jedoch eine enge Zusammenlagerung wie bei PE, daher hat isotaktisches Polypropylen (PP-I) auch eine etwas geringere Dichte. Syndiotaktisches Polypropylen (PP-S) ist transparent und sehr schlagzäh, allerdings weniger steif als isotaktisches PP. Ataktisches Polypropylen (PP-R) ist amorph, bei Raumtemperatur jedoch klebrig und wird vornehmlich als Vergussmasse in der Elektroindustrie sowie als Dicht- oder Dämmmasse verwendet.

Die elektrischen Isoliereigenschaften und die chemische Beständigkeit des unpolaren PP sind mit PE vergleichbar; PP ist etwas empfindlicher gegen starke Säuren und Oxidationsmittel. PP ist wie PE brennbar und nicht witterungsbeständig. Auch hier sind entsprechende Additive erforderlich.

Aufgrund seiner hohen Dehnbarkeit und seiner relativ hohen dynamischen Belastbarkeit erlaubt PP die Herstellung von Filmscharnieren.

PP ist der Massenkunststoff mit dem stärksten Wachstum. Mehr als ein Drittel der synthetischen Fasern werden auf Basis PP hergestellt. Weitere wichtige Anwendungsbereiche sind Verpackungsfolien sowie starre Verpackungen. Die in jüngerer Zeit entwickelten neuen Spezialtypen finden zunehmend auch als Ersatz für technische Thermoplaste wie ABS und PA Verwendung. PP wird auch als Gehäusewerkstoff für Kleinelektrogeräte, Formteile für Haushaltsgeräte sowie für Karosserieteile (Stoßfänger) und Formteile im Innenraum von Kraftfahrzeugen eingesetzt. Im Bausektor findet PP unter anderem für Rohre, Heißwasserbehälter und Gartenmöbel Verwendung.

Wichtige Spezialtypen und Copolymere sind:

- **glasfaserverstärkte Typen (PP-GF):** mit bis zu 40 % Glasfasern für höhere Steifigkeit
- **geschäumte PP-E-Typen (expanded):** mit Dichten bis hinunter zu 10 kg/m<sup>3</sup>

- **Copolymere mit Ethylen (EPM):** oder mit Ethylen und Ethylenidennorbonen, Dicyclopentadien oder 1,4-Hexadien (EPDM); dies sind bedeutende Synthesekautschuke mit guter Hitze- und Wetterbeständigkeit
- **(PP+EPDM)-Blends:** diese Produkte zählen zu den thermoplastischen Elastomeren

### 3.3.3 Polyvinylchlorid (PVC)

Nach Polyethylen und Polypropylen belegt Polyvinylchlorid (PVC) allen Unkenrufen zum Trotz mit 15 % Anteil an der Kunststoffproduktion immer noch den dritten Platz.

Vinylchlorid wird außer als Ausgangsmonomer für PVC auch zur Ppropfcopolymerisation von Acrylatkautschuken und Ethylen-Vinylacetat-Copolymeren verwendet.

PVC lässt sich durch die Verwendung von Weichmachern zu einem relativ elastischen Material verarbeiten; die hierzu üblicherweise verwendeten Phthalsäureester (Phthalatweichmacher) sind jedoch toxikologisch umstritten.

Aufgrund des hohen Chloranteils in Vinylchlorid (etwa 56 %) hat Hart-PVC (PVC-U, unplasticized) eine hohe Dichte von etwa 1380 bis 1400 kg/m<sup>3</sup>. Die Dichte von Weich-PVC (PVC-P, plasticized) wird von Art und Menge des Weichmachers bestimmt. Bei einem Gehalt von 25 % Phthalatweichmacher liegt die Dichte von Weich-PVC bei etwa 1240 bis 1280 kg/m<sup>3</sup>. Wird der Anteil auf 40 % erhöht, beträgt die Dichte etwa 1150 bis 1200 kg/m<sup>3</sup>. Die geringe thermische Stabilität von PVC, die schon die technische Anwendung der ersten Vinylchlorid-Polymerisate erheblich erschwerte, erfordert auch heute noch grundsätzlich den Zusatz von Stabilisatoren. Diese basieren auf Schwermetallen wie Blei und Cadmium, werden aber zunehmend durch Produkte auf Basis von Calcium, Zinn oder Zink ersetzt. Optimal stabilisiertes PVC besitzt eine gute Witterungsbeständigkeit, lediglich besonders helle PVC-Produkte erfordern auch den Einsatz von UV-Absorbern. Zusätzlich werden auch Fließ- und Gleitmittel zugesetzt. Im Gegensatz zu anderen Thermoplasten wird PVC vielfach als Pulver angeboten. Weich-PVC ist auch als Paste durch Streichen oder Gießen verarbeitbar.

Der hohe Chloranteil von PVC-U ermöglicht die Herstellung von als flammwidrig, schwerentflammbar oder selbstverlöschend bezeichneten Produkten, eine der bekanntesten Eigenschaften des PVC. PVC-U ist zwar brennbar, erlischt aber nach Entfernen der Zündquelle. Durch Zusatz von Weichmacher wird der Chlorgehalt verringert. Bei einem rechnerischen Chlorgehalt unterhalb von etwa 30 % brennt PVC-P auch nach Entfernen der Zündquelle weiter. Dies wird zwar erst bei einer Dosierung von etwa 85 phr, entsprechend etwa 46 %, Weichmacher erreicht, aller-

# 4

## Kunststoffadditive

Kunststoffe werden oft mit Additiven modifiziert, um die an sie gestellten Anforderungen zu erfüllen. Übliche Additive sind Flammenschutzmittel, Farbmittel, Weichmacher (insbesondere bei Elastomeren und PVC) sowie Füllstoffe und Fasern. Je nach Art und Menge wirken sich Additive in unterschiedlicher Weise auf die mechanischen, thermischen und elektrischen Werte sowie das Brandverhalten von Kunststoffen aus.

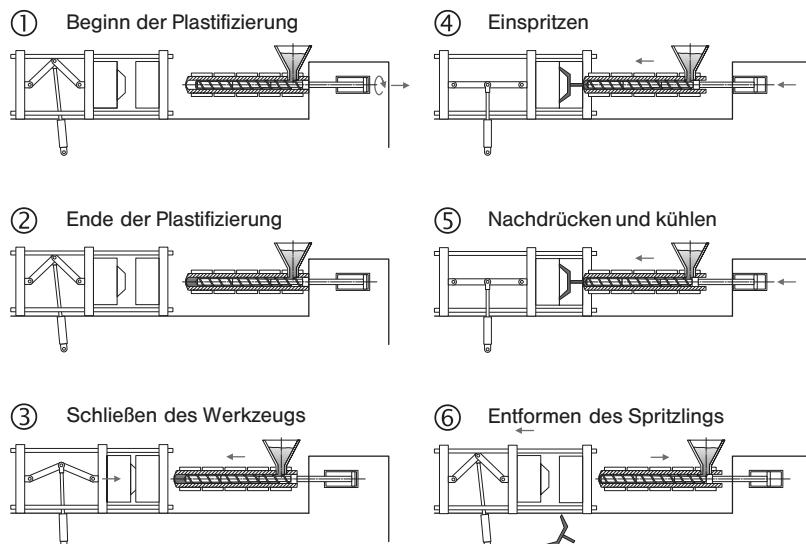
### ■ 4.1 Füllstoffe

Füllstoffe wurden bereits vor der Entwicklung synthetischer Kunststoffe verwendet. Der wichtigste polymere Rohstoff des 19. Jahrhunderts, Kautschuk, wurde aufgrund rasch wachsender Nachfrage und der Monopolstellung Brasiliens und später Großbritanniens immer teurer. Daher versuchte man mit Füllstoffen als Streckmittel den immer weiter steigenden Preis auszugleichen. Nachdem man die verstärkende Wirkung bestimmter Füllstoffe erkannt hatte, wurden Füllstoffe für die Herstellung von Elastomeren unverzichtbar. Auch in modernen Thermoplasten werden heute Füllstoffe eingesetzt, um bestimmte Eigenschaften zu erzielen. Formmassen auf Basis von Phenol-, Harnstoff- oder Melaminharzen werden erst durch Füllstoffe verarbeitbar.

Werden mechanische Eigenschaften wie Festigkeit und Steifigkeit eines Polymeren durch Füllstoffe verbessert, spricht man von verstärkenden Füllstoffen. Auch eine höhere Wärmeformbeständigkeit, bessere elektrische Leitfähigkeit, höhere Schlagzähigkeit und verbesserte Maßhaltigkeit sowie geringere Wärmeausdehnung lassen sich durch geeignete Füllstoffzusätze erzielen.

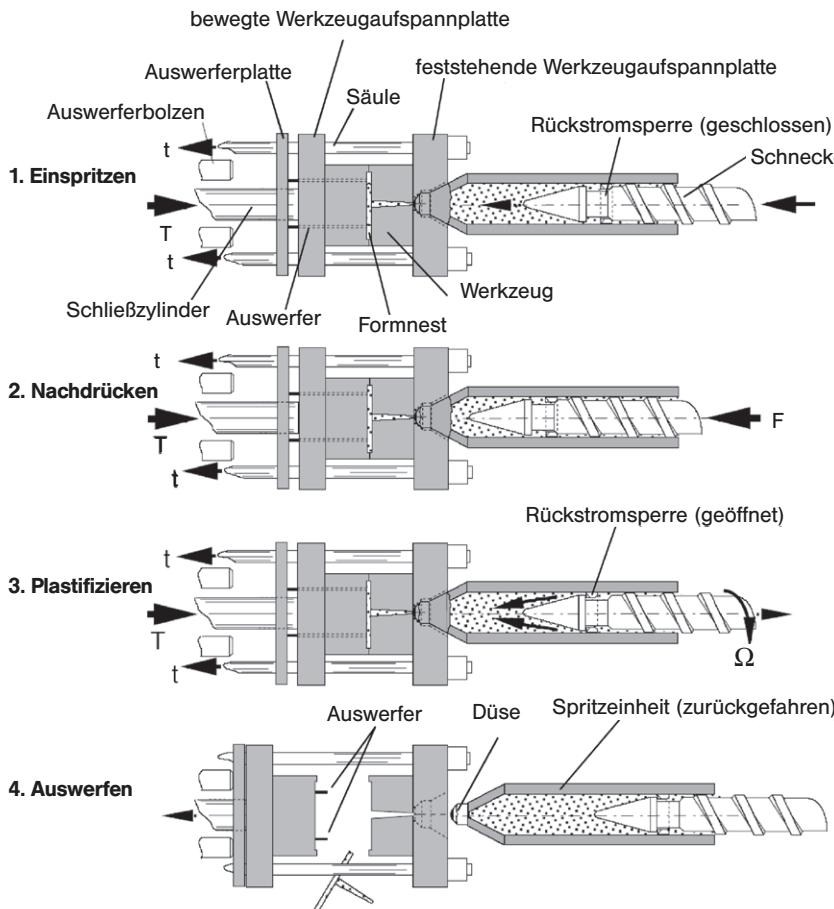
Zunächst wird das getrocknete Granulat durch entsprechende Dosievorrichtungen in den Plastifizierteil gebracht. Durch die Reibung an der rotierenden Förder schnecke und gleichzeitiger Erwärmung der Plastifiziereinheit wird das Granulat für den folgenden Einspritzvorgang aufgeschmolzen. Die Schmelze bildet vor der Schnecken spitze ein Polster; sobald dessen Menge zur Füllung des Werkzeugs ausreicht, wird die Schmelze unter Drücken von mehreren hundert bis weit über 1.000 bar durch Verschieben der mittlerweile still stehenden Plastifizierschnecke eingespritzt. Durch die Temperierung des Werkzeugs auf geeignete Entformungs temperatur beginnt das Formteil zu erstarren. Die Entformungstemperatur wird so gewählt, dass sich zwar das Bauteil ohne Deformation entformen lässt, gleichzeitig aber noch so hoch ist, dass möglichst wenig Eigenspannungen durch die Abkühlung auftreten. Mit der Abkühlung der Schmelze ist eine Volumenkontraktion verbunden, die zu Einfallstellen führen kann. Daher wird bis zum Erreichen der Sie gelzeit (wenn das Material im Angusskanal erstarrt ist und damit das Werkzeug versiegelt) ein Druck zwischen etwa 600 und 1.500 bar aufrechterhalten (Nach druck). Anschließend wird die Schnecke zurückgezogen und neu befüllt, dann beginnt wieder die Plastifizierung. In der Zwischenzeit kühlt das Formteil ab, bis es schließlich beim Öffnen des Werkzeugs durch Stifte, Platten oder Druckluft ausgestoßen wird. Das durch die Abkühlung im Angusskanal des Werkzeugs verbleibende erstarrte Material verbleibt als sogenannter Anguss zunächst am Formteil und muss mechanisch entfernt werden.

Moderne Werkzeuge verwenden beheizte Angusskanäle (Heißkanäle); das hierin befindliche Material wird bis zum nächsten Zyklus in Schmelze gehalten. Heißkanäle vermeiden somit das Regranulieren und Rückführen der Angüsse in den Produktionsprozess, sind aber kostenintensiv.



**Bild. 5.3** Prinzipieller Verfahrensablauf beim Spritzgießen [7]

Die Verfahrensparameter Massestemperatur, Werkzeugtemperatur, Einspritzdruck, Nachdruck und die jeweiligen Zeiten sind für jeden Thermoplasten verschieden, ihre optimale Einstellung ist für die Herstellung fehlerfreier Formteile unabdingbar. Die Bilder 5.3 und 5.4 zeigen den prinzipiellen Verfahrensablauf.



**Bild. 5.4** Grundoperationen beim Spritzgießen [10]

Die Auslegung von Thermoplastbauteilen und den zugehörigen Spritzgießwerkzeugen, insbesondere die Gestalt und Lage der Angüsse, ist ein weiterer entscheidender Faktor, denn durch den Angusskanal fließt die Schmelze in die Kavitäten. Oft werden hierzu Füllsimulationen mit spezieller CAD-Software verwendet. (CAD – Computer Aided Design, Auslegung von geometrischen Formen durch computergestützte Berechnung). Dabei sind grundlegende Konstruktionsregeln zu beachten. Einige Beispiele seien im Folgenden erwähnt.

# 9

## Glossar

### **Aliphatische Verbindungen (Aliphaten)**

Kohlenwasserstoffe mit linearen oder verzweigten Ketten.

### **Anisotropie**

Richtungsabhängigkeit von Eigenschaften. Durch die Verarbeitung werden die vorher ungeordnet vorliegenden Makromoleküle in Verarbeitungsrichtung angeordnet; hierdurch wird insbesondere das mechanische Verhalten richtungsabhängig. Festigkeit und Steifigkeit sind längs der Spritzrichtung meist höher als quer dazu. Dementsprechend findet man in Polymerdatenblättern oft gesonderte Angaben (längs und quer). Anisotropie ist besonders ausgeprägt bei faserverstärkten Kunststoffen, da die Fasern sich bevorzugt in Spritzrichtung orientieren.

### **Anorganische Verbindungen**

Alle Verbindungen chemischer Elemente mit Ausnahme der Kohlenwasserstoffe. Es sind etwa 100.000 anorganische Verbindungen bekannt.

### **Aromatische Verbindungen (Aromaten)**

Zyklische (ringförmige) vollkonjugierte ungesättigte Kohlenwasserstoffe. Aromaten zeigen von ungesättigten aliphatischen Kohlenwasserstoffen abweichende chemische Reaktionen. Der Name leitet sich vom angenehmen Geruch der ersten Produkte ab, die aus natürlichen Stoffen extrahiert wurden.

### **Arylgruppe**

Bestandteil von Molekülen auf Basis aromatischer Kohlenwasserstoffe. Die durch Abspaltung eines Wasserstoffatoms aus Benzol erhaltene Phenylgruppe ist die einfachste Arylgruppe.

# Index

## A

Abdeckungen 136  
Abrieb 42  
Acetatseide 17  
Acrylatkautschuk 93  
Acrylglas oder kurz Acryl 125  
Acrylnitril-Butadien-Kautschuk 13, 92  
Acrylnitril-Butadien-Styrol-Kunststoff 119  
Acrylnitril-Styrol-Acrylat-Kunststoff 120  
Additive 91  
Agrarfolien 144 f., 147  
Aktivatoren 90  
aktive Füllstoffe 91  
akustische Eigenschaften 50  
aliphatische Verbindungen  
  (Aliphaten) 225  
Allotropie 55  
Alterungsschutzmittel 91, 160  
Aminoplaste 77, 97  
amorphe Thermoplaste 27, 85  
Anisotropie 173, 225  
anorganische Verbindungen 225  
Antihaltbeschichtungen 138  
Antistatika 162  
Anvulkanisation 10, 91  
Anwendungen 110  
Aramidfasern 124, 157  
Armaturentafeln 131  
aromatische Verbindungen  
  (Aromaten) 71, 225  
Asphalt 2, 7  
ataktisch 74  
Atome 66

Aufbereiten 166  
Aushärten 55  
Auskleidungen 138

## B

Bakelit 18  
Bälge 94, 135, 137  
Barrierefolien 54, 147  
Baudübel 124  
Baulager 93  
Bedienelemente 136  
Behälter 98  
Bembergseide 17  
Bernstein 3  
beschichtete Gewebe 93  
Beschichtungen 140  
Beständigkeit 87  
Bioabfallbeutel 147  
Biokompatibilität 140  
biologische Abbaubarkeit 145  
Biopolymere/Biokunststoffe 143  
Birkenpech 7  
Bitumen 2  
Blasformen 86  
Blends 76, 95, 119, 124 f., 127, 129, 131, 145, 176  
Blu-ray Discs 127  
Bootsrümpfe 98  
Brandverhalten 197  
Brems- und Kupplungssteile 97  
Brillenfassungen 147  
Bruchdehnung 226

Bruchspannung 226  
 Buna® 13  
 Butadien 71, 88  
 Butadien-Acrylnitril-Kautschuk 119  
 Butadienkautschuk 21, 52, 119  
 Butylkautschuke 94

## C

CAMPUS 193  
 Casein 13  
 Cellon 16  
 Cellophan 16  
 Celluloid 15  
 Celluloseacetat 16  
 Celluloseacetobutyrat 147  
 Celluloseacetopropionat 147  
 Cellulosehydrat 148  
 Chardonnet-Seide 16  
 Charpy 195  
 Chemikalienschläuche 93  
 chemische Beständigkeit 51, 214  
 chemische Bindungen 67  
 chemische Elemente 66  
 chemischer Apparatebau 116  
 Chlorhydrinkautschuke 94  
 chloriertes Polyethylen 111  
 Chloroprenkautschuk 22, 83, 92  
 chlorsulfonierte Polyethylen 111  
 Coextrusionstechnik 176  
 Compact Discs (CD) 127  
 Copolymerisation 76  
 Cycloolefin-Copolymere 111

## D

Dachfolien 93  
 Dachmodule 128  
 Dämmmaterialien 98  
 Dämpfungselemente 136  
 Dauerschwingversuch 199  
 Dehnungsfugenbänder 136  
 Dichte 29  
 Dichtelemente 136  
 Dichtungen 93 f., 134, 137 f., 141 f.

Dielektrizitätszahl 198  
 Diffusion 54  
 Digital Versatility Discs (DVD) 127  
 Dithiocarbamate 12  
 Doppelbindung 70  
 Doppelbrechung 128  
 Druckverformungsrest 199  
 duktiles Verhalten 39, 227  
 Durchgangswiderstand 227  
 Duroplaste 27, 78, 96  
 dynamische Belastung 43

## E

Ebonit 89  
 Edelgaskonfiguration 67  
 Einwegbecher und -bestecke 145  
 Elastizitätsmodul, E-Modul 31, 227  
 Elastomere 27, 40, 78, 88  
 Elastomerlegierungen 133  
 Electroplating 192  
 elektrische Leitfähigkeit 49  
 elektrische Prüfungen 198  
 elektrisch leitfähige Polymere 142  
 Elektroisolierfolien 126  
 Elektroisolierlacke 124  
 Elektronen 66  
 Elektronengas 27, 67  
 Elektronenschale 67  
 elektrostatische Aufladung 49  
 Elektrotechnik 98, 119, 128, 138 f., 141  
 energieelastisches Verhalten 31  
 energiereiche Strahlung 54  
 entropieelastisches Verhalten 82, 90  
 Epoxidharze 77, 97, 188  
 Ermüdungsverhalten 43  
 ESD – electrostatic discharge 49  
 Estergummi 21  
 Ethan 70  
 Ethylen-Propylen-Kautschuk 23, 94  
 Ethylen-Vinylacetat-Copolymere 111  
 Ethylen-Vinylalkohol-Copolymere 111  
 Extenderfüllstoffe 90  
 Extrusion 86, 91, 173  
 Extrusionsblasformen 176

**F**

- Fahrzeugrücklichter 125  
 Faltenbälge 111  
 Farbmittel 80, 161  
 Fasern 120  
 Faseroptiken 142  
 Faserwerkstoffe 156  
 Federelemente 130  
 Feinmechanik 123  
 Fensterprofile 116  
 Filmscharniere 44, 112, 228  
 Filter- und Pumpengehäuse 123  
 Flammschutzmittel 158  
 Flaschen 126  
 Fließen 34, 36  
 Fluorkautschuke 94  
 Fluorkunststoffe 137  
 Folien 110, 115  
 Förderbänder 94, 148  
 Formbeständigkeitstemperatur 84, 196  
 Formgebung 91  
 Formteile 96, 98, 128  
 Formverschmutzung 87  
 fotoabbaubaren Kunststoffe 148  
 Friction 90  
 Fügen 185  
 Füllstoffe 90, 155  
 Fussbodenbelägen 115

**G**

- Gagat 14  
 Galolith 16  
 Galvanisieren 129, 192  
 Galvanisierung 119  
 Gartenmöbel 112  
 Gasdurchlässigkeit 54  
 Gasinjektion 172  
 Gas- und Kupplungspedale 122  
 Gebrauchstemperatur 45, 196  
 Gebrauchstemperaturbereich 81, 229  
 Gehäuse für Elektrowerkzeuge 123  
 Gehäuse für Haushalts- und Elektrogeräte 128

- Gehäuse in der Elektronikindustrie 117  
 Gehäuseteile von Elektrowerkzeugen 129  
 Gewebeschläuche 137  
 Gießelastomere 98  
 Glanzstoff 17  
 Gläser 28  
 glasfaserverstärkte Kunststoffe 19, 157  
 Glastemperatur 83  
 Glastemperatur, Glasübergangstemperatur 27, 45, 229  
 Gleiteigenschaften 138  
 Gleitelemente 142  
 Gleitlager 123, 138, 141  
 Gleitmittel 162  
 Glühdraht 197  
 Griffteile 136, 147  
 Gummi 7, 88, 148  
 gummielastischen Eigenschaften 88  
 gummielastisches Verhalten 95  
 GWFI – Glow-wire-flammability 197  
 GWIT – Glow-wire-ignitability 197

**H**

- Haftmittel 91  
 Halbzeuge 55, 229  
 Härte 42, 81, 133, 198  
 Hartgummi 89  
 Hartschaum 98  
 Hart/Weich-Kombinationen 172  
 Haushaltsgeräte 97  
 Haushaltswaren 119  
 heat-build-up 45  
 Heat Distortion Temperature 196  
 Hebel 130  
 Heißkanäle 168  
 Heißpressen 55  
 Heizbälge 93  
 Heizelementschweißen 186  
 Hevea brasiliensis 7  
 Hinterspritztechnik 172  
 Hinweisschilder 125  
 Hochdruckpolyethylen 23  
 Hochleistungskunststoffe 137

Hochleistungs- oder Hochtemperaturkunststoffe 108  
 Hybridbauweise 122  
 Hydrolyse 52, 230  
 Hygieneprodukte 145

**I**

Imprägnierung 115, 138  
 injection blow molding 176  
 Innenmischer 90  
 Integralschäume 98, 181  
 intrinsisch leitfähige Polymere 143  
 Ionen 77  
 Ionenbindung ff. 67  
 Ionengitter 28  
 Isopren 12, 88  
 isotaktisch 74  
 Isotope 66  
 Isotropie 230  
 Izod 195

**K**

Kabel 93 f., 96, 136 ff.  
 Kalandrieren 179  
 Kaltschweißen 189  
 Kämme 147  
 Karosserien 98  
 Karosserieteile 112  
 Kasein 16  
 Kaskadenspritzgießen 173  
 Katalysatoren 71 ff.  
 Kautschuk 7, 58, 89, 133, 149  
 Kautschuken 133  
 Keilriemen 93  
 Keilriemenscheiben 142  
 Kennwerte von Thermoplasten 193  
 Keramische Werkstoffe 28, 35  
 Kerbschlagbiegeversuch 195  
 Kettenabbau 52, 54, 87  
 Kfz-Heizungssysteme 116  
 Kfz-Innenraumteile 119, 129  
 Kfz-Karosserieteile 129, 131  
 Kfz-Motorraum 122

Kfz-Unterbodenschutz 115  
 Klebebänder 126  
 Kleben 188  
 Klebstoffe 116, 147  
 Knöpfe 147  
 kohlenstofffaserverstärkten Kohlenstoff (CFC) 97  
 Kohlenwasserstoffe 27, 70, 230  
 Kolbenringen 141  
 Kollodium 15  
 Kolophonium 3  
 Kompostieren 144  
 Kondensationspolymerisation 77  
 konjugierte Doppelbindungen 71  
 Konstruktionsregeln 169  
 Konstruktionswerkstoffe 28, 61  
 kovalente Bindung 28, 67 ff., 81  
 Kraftstoffbehälter 111  
 Kraftstoffleitungen und -tanks 122  
 Kratzfestlacke 127  
 Kriechen 37  
 Kriechstromfestigkeit 198  
 Kristallisation 83, 132  
 Kristallisationsgrad 27  
 Kristallite 46, 85  
 Kristallit-Schmelztemperatur 27, 45, 83  
 Küchenarbeitsplatten 125  
 Kugeleindrucktemperatur 196  
 Kunstfasern (Acryl) 119  
 Kunstfasern (siehe Synthesefasern) 192  
 Kunstleder 115  
 Kunstseide 17  
 Kunststoffadditive 155  
 Kunststoffbedarf 62  
 Kunststoffe 4  
 Kunststoffproduktion 58  
 Kupferkunstseide 17  
 Kupplungselemente 130, 137

**L**

Laccain 18  
 Lacke 98, 147  
 Laminate 98

Lampengehäuse 122  
 Laserschweißen 187  
 Latex 7  
 legieren 3  
 Leitruße 49  
 Leuchtenabdeckungen 125  
 Lexan® 24  
 Lichtkuppeln 147  
 Lichtschutzmittel 160  
 Lichtwerbung 125, 147  
 lineare Polymere 73  
 Linoleum 15  
 Linsen 128  
 Löwenzahn 148  
 Luftschlüsse für Reifen 93  
 Luft- und Raumfahrt 140 f.

## M

Makrolon® 24  
 Makromolekülen ff 72  
 Massenzahl 66  
 Massetemperatur 45, 84, 230  
 Mastikation 9  
 Matratzen 98  
 maximal zulässige Dehnung 38  
 Mechanische Eigenschaften 195  
 Medizintechnik 128, 139 f., 147  
 Mehrkomponentenspritzguss 172  
 Melaminharze 19  
 Membranen 93  
 Metalle 31  
 Metallisieren 192  
 Methylkautschuk 12  
 Migration 51  
 Mikrowellengeschirr 141  
 Mineralfasern 45  
 Mischwalzwerk 91  
 Möbelbeschläge 116, 126, 130  
 Moleküle 67  
 Molmasse 230  
 Monomeren 72 ff.  
 Motorlager 93  
 Motorraum 124  
 Mowilith 20

Müllbeutel 144  
 Muttern 123

## N

natural oil polyols 149  
 Naturkautschuk 3, 6, 83, 88, 92, 148  
 Natürliche Polymere 7  
 Nebenvalenzkräfte 81, 231  
 Neoprene® 13  
 Neutronen 66  
 Nieten 189  
 Nitrilkautschuk 119  
 Nitrocellulose 14  
 Nitrolacke 16  
 Nylon® 22

## O

Oberflächen- und Durchgangs- widerstand 198  
 Öle 51 f.  
 Olefine 231  
 optische Eigenschaften 49  
 optische Speichermedien 127  
 optische Teile 125, 128  
 Orbitale 66  
 Ordnungszahl 66  
 organische Verbindungen 231  
 O-Ringe 135  
 Ozon 52, 159  
 Ozonschutzmittel 53

## P

Parkesin 15  
 Perlon® 22  
 Permittivität 198  
 Phenoplaste 17, 77  
 Pigmente 161  
 Plasmabeschichtung 192, 232  
 plastische Verformung 33  
 Platten (Bausektor) 128  
 Plexiglas® 21  
 Polster 98

Polyacrylnitril 118  
 Polyaddition 77  
 Polyamide 77, 102, 108  
 Polyamidimide 141  
 Polyaryletherketone 109, 140  
 Polyarylsulfone 138  
 Polybutylensuccinat 146  
 Polybutylenterephthalat 102, 127  
 Polycarbonat 23, 77, 103, 127  
 Polychloropren 188  
 Polyester 52, 77, 127  
 Polyesterharze 19, 97  
 Polyetherimide 141  
 Polyethersulfone 138  
 Polyethylen 102, 108, 110  
 Polyethylenterephthalat 23, 108, 125  
 Polyhydroxybuttersäure 145  
 Polyimide 109, 140  
 Polykondensation 77  
 Polylactide 145  
 polymere Werkstoffe 78, 81  
 Polymerisation 72 ff., 77  
 Polymerisationsgrad 75  
 Polymethylmethacrylat 21, 108, 124  
 Polyoxymethylen 108, 130  
 Polyphenenether 130  
 Polyphenylensulfid 109, 139  
 Polyphenylensulfone 138  
 Polypropylen 108, 112  
 Polystyrol 21, 117  
 Polystyroltypen 108  
 Polysulfone 109  
 Polytetrafluorethylen 22, 51, 109, 137  
 Polyurethane 22, 52, 77, 80, 95 ff., 149, 188  
 Polyvinylacetat 20  
 Polyvinylalkohole 147  
 Polyvinylchlorid 20, 108, 113  
 Polyvinylidenchlorid 20  
 Polyvinylidenfluorid 119, 138  
 Prägefölien 114  
 Primärenergiebedarf 62  
 Profile (ohne Dichtungsprofile) 115, 134  
 Protonen 66

Prototypen 123  
 Pyrolyse 11, 233

**Q**

Quellung 51  
 Querkontraktion 31, 233

**R**

Radikale 71, 77, 233  
 Raketenbauteile 97  
 Rapid Prototyping 233  
 Reibung 42  
 Reifen 93 f.  
 Reifen (ohne Kfz-Reifen) 124, 135  
 Relativer Temperatur Index (RTI) 233  
 relative Temperaturindex 197  
 Reyon 17  
 Rheologische Eigenschaften 194  
 Riemen 96  
 Riemen (ohne Keil- und Zahnriemen) 135  
 RIM (Reaction Injection Molding) 123  
 Risszähigkeit 35  
 Risszähigkeit und Risswiderstand 234  
 Rohre 112, 115 f., 125, 138  
 Rollen 98, 123, 126, 135, 137  
 Rollläden 116  
 Rotationsformen (Rotomolding) 179  
 Rubber 8  
 Ruß 91 f., 156, 160

**S**

Sandwichverfahren 8  
 Sanitärteile 97, 125  
 Schallplatten 116  
 Schall- und Wärmedämmung 117  
 Schäumen 181  
 Schäumen von Polystyrol 23  
 Schaumstoffe 22, 30, 181  
 Schellack 3, 17  
 Schichtpressstofftafeln 97  
 Schießbaumwolle 14

- Schiffbau 97 f.  
 Schlagzähmodifikatoren 162  
 Schläuche 93 f., 96, 115, 134  
 Schleuderguss 180  
 Schmelze 87  
 Schmelze-Masse-Fließrate 194  
 Schmelze-Volumen-Fließrate 194  
 Schmelzindex 194  
 Schmelzkerntechnik 173  
 Schmelztemperaturen 46  
 Schnappverbindungen 39, 190  
 Schrauben 123, 189  
 Schrauben und Muttern 130  
 Schreibfolien 126  
 Schubmodul 82, 234  
 Schubmodulkurve 84  
 Schuhsohlen 96  
 Schutzbekleidung 93, 124  
 Schweißen 186  
 Schwiegermutterseide 16  
 Schwindung 86, 171, 194  
 Schwingspielzahl 43  
 Seiten- und Heckscheiben 128  
 Selbstverstärkende teilkristalline  
     Polymere 141  
 Shrilk 151  
 Siegelzeit 168  
 Silikonkautschuk 93  
 Sintern 55  
 Skischuhe 137  
 smoked sheets 8  
 Sockelleisten 116  
 Spannungs-Dehnungs-Kurve 30  
 Spannungsrissskorrosion 51 f., 231  
 Spezialkunststoffe 109, 142  
 Sportgeräte 97, 124  
 Sportschuhe 134  
 Sportschuhsohlen 137  
 Spritzgießen 91, 167  
 Spritzgussartikel (siehe Formteile) 127  
 Spritzgussverfahren 86  
 Spritzprägen 172  
 Spritzstreckblasformen 176  
 Sprödbrüche 35  
 Stabilisatoren 113, 159  
 Standardthermoplaste 108  
 Stangen 125  
 Stegplatten 125  
 Stoßfänger 123  
 Straßenleitpfähle 116  
 Streckblasen 176  
 Streckdehnung 34  
 Streckgrenze 34, 235  
 Streckspannung 34  
 Strukturauteile 122 f.  
 Strukturauteile für Fahrzeuge 97, 123  
 Strukturformel 69  
 Styrenics 117  
 Styrol-Acrylnitril-Kunststoff 118  
 Styrol-Butadien-Kautschuk 13, 21, 118  
 Styrol-Butadien-Styrol-Block-  
     copolymere 132  
 Styroloid 21  
 Styropor® 23  
 Summenformel 69  
 Surrogate 5  
 syndiotaktisch 74  
 synergetische Effekte 51, 76
- T**
- technische Dehngrenze 35  
 technische Gummiwaren 94  
 technische Thermoplaste 108, 112  
 teilkristalline Thermoplaste 27, 85  
 Tempern 171, 182  
 thermische Kennwerte 196  
 thermische Leitfähigkeit 67  
 Thermoplaste 27, 36, 78, 85, 101  
 thermoplastische Elastomere 78, 95,  
     108, 132  
 Trägermaterial für fotografische Filme  
     und Magnetbänder 126  
 Tragetaschen 144  
 Trag- und Spannseile 124  
 Treibmittel 91, 117, 162, 181  
 Trocknung 166

**U**

- UL 94 197  
 Ultraschallschweißen 187  
 Umformen 183  
 ungesättigt 70  
 Unterlagen 136  
 Urformen 167  
 UV-Absorber 92, 160

**V**

- Valenzelektronen 67  
 Ventilsitze 141  
 Verarbeitung 54, 165  
 Verarbeitungshilfsmittel 91  
 Verarbeitungstemperaturen 84  
 Verbundwerkstoffe 1, 91  
 verchromte Kunststoffteile 119  
 Veredelung 191  
 Vergilbung 54  
 Vergussmasse 112  
 Verklebungen für Luft- und Raumfahrt 98  
 Verkleidungen 98  
 vernetztes Polyethylen 111  
 Vernetzung 41, 83, 88  
 Vernetzungsdichte, Vernetzungsgrad 27, 236  
 Verpackungen 111 f., 125 f., 145  
 Verpackungen für Lebensmittel 117  
 Verpackungsfolien 112  
 Verscheibungen 128  
 Verschleiß 42  
 verzweigte Polymere 73  
 Vibrationsdämpfer siehe Dämpfungs-elemente 136  
 Vibrationsschweißen 187  
 Vicat-Erweichungstemperatur 196  
 Vinylchlorid 71  
 Viscose 17  
 Viskosität 194, 236

**Vulkanisation**

- 9, 89  
 Vulkanisationsbeschleuniger 12, 90

**W**

- Walzenbeläge 94  
 Wärmeausdehnungskoeffizient 236  
 Wärmeausdehnung und Wärmeleitfähigkeit 47  
 Wärmebehandlung 55  
 Wärmeformbeständigkeit 237  
 Wärmeleitfähigkeit 237  
 Warmformen 183  
 Waschbecken 125  
 Wasserstoffbrückenbindungen 121, 132, 236  
 Weichmacher 91, 113  
 Weichschaum 98  
 Weißbruch 114  
 Wellenmechanik 66  
 Weltproduktion 62  
 Werkstoffe 1  
 Wirbelsintern 180

**X**

- Xylonit 15

**Y**

- Yellow Cards 238  
 Yellowness Index 238

**Z**

- Zahnräder 123, 126, 130, 134, 140  
 Zahnriemen 94, 137  
 Zellglas 16  
 Zugfestigkeit 238  
 Zugmodul (siehe Elastizitätsmodul) 100  
 Zugversuch 195  
 Zuschlagstoffe 80

## 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, 65  
 Bevan, John 17  
 Blyth, J. 21  
 Bock, Walter 13  
 Bohr, Niels 66  
 Bouchardat 12  
 Brandenberger, Jaques E. 16  
 Buchholz, Karl 23  
 Carothers, Wallace Hume 13, 22 f.  
 Castan, Pierre 19  
 Charles, Jacques Alexandre César 8  
 Condamine, Charles-Marie de La 7  
 Cross, Charles Frederick 17  
 Cross, Robert 11  
 Dalton, John 65  
 Delbrück, K. 12  
 Demokrit 65  
 Dickson, J.T. 23  
 Dirac, Paul Adrien 66  
 Droste, W. 22  
 Dunlop, John Boyd 10  
 Eastman, George 15  
 Eichengrün, Arthur 16  
 Einhorn, A. 19, 23  
 Einstein, Albert 66  
 Ellis, C. 19  
 Empedokles 65  
 Escales, Richard 19  
 Faraday, Michael 11, 19  
 Fawcett, Eric William 22  
 Ford, Henry 12  
 Fordlandia 13  
 Fox, D. W. 23  
 Freiherr Drais von Sauerbronn,  
     Karl Friedrich Christian Ludwig 8  
 Fresneau, C. F. 7  
 Gäth, Rudolf 23  
 Gibson, Reginald Oswald 22  
 Goldschmidt, C. 19  
 Goodyear, Charles Nelson 9  
 Gottlob, K. 12  
 Hamburger, A. 19  
 Hancock, Thomas 9  
 Harries, Carl Dietrich 12  
 Hayward, E. 9  
 Henrich, W. 19  
 Hérrisant, L. A. M. 8  
 Höchtlén, A. 22  
 Hofmann, A. W. 21  
 Hofmann, Fritz 12  
 Hölzer, K. 18  
 Hyatt, John Wesley und Isaiah 15  
 John, Hanns 18  
 Klatte, Fritz 20  
 Kleiner, Helmut 13  
 Köhler, R. 19  
 Kolumbus, Christoph 7  
 Kondakov, J. 12  
 Konrad, Erich 13  
 Krische, Wilhelm 16  
 Lavoisier, Antoine Laurent 5, 65  
 Leukipp 65  
 Lüdersdorf, F. 9  
 Macintosh, Charles 8  
 Macquer, Pierre-Joseph 8  
 Mark, Hermann 20  
 Matthews, F. E. 12  
 Mendelejew, Dimitri 65  
 Meyer, Carl Heinrich 18  
 Meyer, Kurt Hans 20  
 Meyer, Lothar 65  
 Micellen 20  
 Michelin, Édouard und André 10  
 Nairne, Edward 8  
 Natta, Giulio 23  
 Nieuwland, Julius Arthur 13  
 Oswald, Walter und Wolfgang 12  
 Parkes, Alexander 15  
 Patton, I. G. 22  
 Pauly, H. 16

- Persin, M. W. 22  
Pickles, Samuel 19  
Plunkett, Roy J. 22  
Pollack, Fritz 19  
Priestley, Joseph 8  
Raschig, Fritz 18 f.  
Rebok, J. 22  
Regnault, Henri Victor 20  
Ritter, Adolf von Baeyer 18  
Röhm, Otto 21  
Scherer, O. 22  
Schlack, Paul 22  
Schloffer, F. 22  
Schnell, Hermann 23  
Schönbein, Christian Friedrich 14 f.  
Schrödinger, Erwin 66  
Schützenberger, Paul 17  
Schweizer, Ed. 16  
Seidel, Wolfgang 13  
Simon, Eduard 21  
Spill, Daniel 15  
Spitteler, Adolf 16  
Stastny, Fritz 23  
Staudinger, Herrmann 6, 19 ff.  
Strange, E. H. 12  
Swan, Joseph Wilson 16  
Thomson, Robert William 10  
Tilden, W. A. 12  
Tollens, B. 19  
Tschunkur, Eduard 13  
Walton, Frederick Edward 15  
Whinfield, J. R. 23  
Wickham, Henry 10  
Williams, E. G. 22  
Williams, Greville 11, 19  
Zacharias, E. 20  
Ziegler, Karl 23