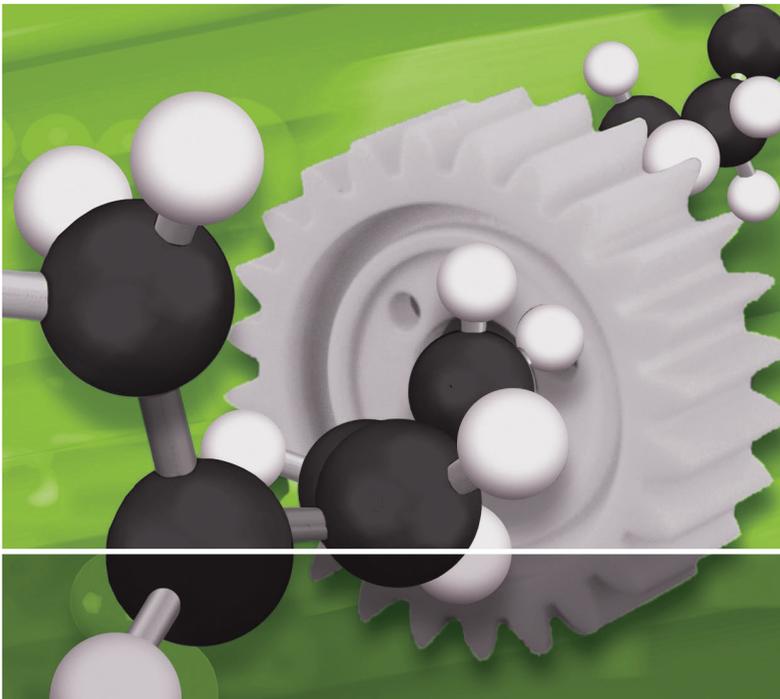


Wolfgang Kaiser

Kunststoffchemie für Ingenieure

Von der Synthese bis zur Anwendung



6., aktualisierte Auflage

HANSER



bleiben Sie auf dem Laufenden!

Hanser Newsletter informieren Sie regelmäßig über neue Bücher und Termine aus den verschiedenen Bereichen der Technik. Profitieren Sie auch von Gewinnspielen und exklusiven Leseproben. Gleich anmelden unter

www.hanser-fachbuch.de/newsletter

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

Wolfgang Kaiser

Kunststoffchemie für Ingenieure

Von der Synthese bis zur Anwendung

6., aktualisierte Auflage

HANSER



Print-ISBN: 978-3-446-47798-8

E-Book-ISBN: 978-3-446-47807-7

Alle in diesem Werk enthaltenen Informationen, Verfahren und Darstellungen wurden zum Zeitpunkt der Veröffentlichung nach bestem Wissen zusammengestellt. Dennoch sind Fehler nicht ganz auszuschließen. Aus diesem Grund sind die im vorliegenden Werk enthaltenen Informationen für Autor:innen, Herausgeber:innen und Verlag mit keiner Verpflichtung oder Garantie irgendeiner Art verbunden. Autor:innen, Herausgeber:innen und Verlag übernehmen in folgedessen keine Verantwortung und werden keine daraus folgende oder sonstige Haftung übernehmen, die auf irgendeine Weise aus der Benutzung dieser Informationen – oder Teilen davon – entsteht. Ebenso wenig übernehmen Autor:innen, Herausgeber:innen und Verlag die Gewähr dafür, dass die beschriebenen Verfahren usw. frei von Schutzrechten Dritter sind. Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt also auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benützt werden dürften.

Die endgültige Entscheidung über die Eignung der Informationen für die vorgesehene Verwendung in einer bestimmten Anwendung liegt in der alleinigen Verantwortung des Nutzers.

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:

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

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.

Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdruckes und der Vervielfältigung des Werkes, 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 UrhG genannten Sonderfälle –, reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

© 2024 Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, München

www.hanser-fachbuch.de

Lektorat: Mark Smith

Herstellung: Cornelia Speckmaier

Coverkonzept: Marc Müller-Bremer, www.rebranding.de, München

Titelmotiv: © Wolfgang Kaiser; Carl Hanser Verlag GmbH

Satz: Lumina Datamatics Ltd., München

Druck und Bindung: CPI Books GmbH, Leck

Printed in Germany

Vorwort zur sechsten Auflage

Liegt ein Fachbuch bereits in der fünften Auflage vor, kann dies in aller Bescheidenheit als Interesse der Käuferschaft an diesem Werk verstanden werden. Auch die vorliegende sechste Auflage versucht, diesem hohen Anspruch erneut gerecht zu werden. Da nach wie vor die Thematik *Nachhaltigkeit, Recycling und Umweltschutz bei Kunststoffen* in der breiten Öffentlichkeit Anlass zu kontrovers geführten Diskussionen gibt, besteht offenkundig immer noch ein Informationsbedarf, frei von Emotionen. Dies bedingt indes ein gewisses Maß an objektiver Sachkenntnis, für deren Vermittlung ein auf zwei Kapitel erweiterter Beitrag wartet.

Selbstredend hält dieses Buch – trotz aller Ergänzungen – weiterhin an seiner ursprünglichen Zielsetzung fest, *der Ingenieurin/dem Ingenieur* eine Art Regelwerk in die Hand zu geben, mit dem sich **ein einfacher Zugang zur Kunststoffchemie** erschließen lässt. Wer jedoch das Buch in der Erwartung aufschlägt, ein Werk allein nur über Kunststoffchemie vor sich zu haben, sieht sich stattdessen einem Mix aus Natur-, Material- und Ingenieurwissenschaften gegenüber.

Dank

Der Verfasser, wäre er nur auf sich allein gestellt gewesen, hätte nie im gleichen Umfang die anspruchsvollen und nötigen Anmerkungen vornehmen können. Mein ganz besonderer Dank gilt somit zuallererst den Herren Prof. Dr. Theo Tervoort (ETH Zürich), Prof. Dr. Walter Caseri (ETH Zürich), Dr. Peter Attenberger (Vinnolit GmbH & Co. KG), Prof. a. D. Dr. Horst Briehl (Hochschule Furtwangen), Dr. Harald Geisler (DIK Hannover), Prof. Dr. Markus Grob (Fachhochschule Nordwestschweiz), Dr. Botho Hoffmann (EMS-CHEMIE AG), Dr. Klaus Kurz (Celanese Corporation), Dr. Frank Riedmiller (Vinnolit GmbH & Co. KG), Dipl.-Ing. Michael Schäfer (Celanese Corporation), Prof. em. Dr. Willy Schlachter (Fachhochschule Nordwestschweiz) und Dr. Dieter Veit (RWTH Aachen). Sie alle haben mit großem Engagement, kostbarer Zeit und profunder Sachkenntnis die einzelnen Kapitel kritisch durchgelesen und wo nötig Änderungen und/oder wertvolle Ergänzungen vorgenommen.

Ein weiterer Dank geht an zahlreiche Leser, darunter viele Kollegen von anderen Universitäten, Technischen Hochschulen oder Fachhochschulen sowie Studierende, die mich freundlicherweise auf Druck-, Schreib- oder sonstige Fehler hingewiesen und/oder Verbesserungsvorschläge gemacht haben.

Nicht zuletzt gebührt erneut allen Mitarbeitenden des Carl Hanser Verlags, die an der Vorbereitung und Herstellung dieses Buches beteiligt waren, ein ganz großes Dankeschön. Namentlich richtet sich dieser Dank an das Lektorat (Frau Rebecca Wehrmann und Herr Dr. Mark Smith) sowie an Frau Cornelia Speckmaier als Herstellerin.

Möge das Buch der geneigten Leserin/dem geneigten Leser zum Lernen, Lehren, Nachschlagen sowie zur Materialwahl einmal mehr nützlich sein.

Vorwort zur ersten Auflage

Die technischen Errungenschaften unserer Zivilisation wären ohne die unzähligen Pionierleistungen der Ingenieure schlichtweg undenkbar („in jedem Ingenieur steckt bekanntlich ein Genie“). Zu Beginn stand meist ein kühner Gedanke bzw. eine zündende Idee, deren Umsetzung in die Realität jedoch geeigneter Werkstoffe bedurfte. In unserer Zeit wecken die Kunststoffe mit einer schier unerschöpflichen Bandbreite von Eigenschaften das besondere Interesse der Ingenieure. Allerdings erfordert der erfolgreiche Umgang mit diesen Werkstoffen ein Minimum an kunststoffchemischen Kenntnissen („Chemie ist nicht alles, aber alles ist nichts ohne Chemie“, Zitat frei nach Arthur Schopenhauer, deutscher Philosoph).

Erklärtes Ziel des Buches ist es denn auch, dieses Minimum an Kunststoffchemie an die Adresse der Ingenieure zu vermitteln. Dabei steht das Bemühen im Vordergrund – insbesondere, wenn der Leser über keine oder nur geringe chemische Vorkenntnisse verfügt – den Einstieg in das faszinierende Gebiet der Kunststoffchemie behutsam vorzunehmen. Zu diesem Zweck erleichtern jeweils am Anfang eines Kapitels mehrere Buchabschnitte ohne chemische Formeln den Zugang zu den einzelnen Kunststoffklassen. Indessen ließ es sich bei der zunehmend komplizierter werdenden chemischen Zusammensetzung und Struktur der Kunststoffe nicht immer vermeiden, gelegentlich auch in die Tiefe und Breite der Chemie vorzustößen. Das vorliegende Werk basiert auf dem in dritter Auflage erschienenen Buch „Einstieg in die Kunststoffchemie“ der beiden Autoren Bernhard Gnauck und Peter Fründt, das bereits seit mehreren Jahren vergriffen ist. In Absprache mit dem Verlag wurde daher eine vollständige Überarbeitung des Buches vorgenommen und wo nötig ergänzt. Dies betrifft vor allem die beiden Kapitel über „Grundlagen“ und „Technologie der Verarbeitung“, die für ein vertieftes Verständnis der Kunststoffe ratsam sind. Ein zusätzliches Kapitel befasst sich unter dem Titel „Kunststoffe als Sonderwerkstoffe“ mit ausgewählten Neuentwicklungen.

Mein besonderer Dank gilt den Herren Prof. Dr. P. Smith (ETH Zürich), PD Dr. W. Caseri (ETH Zürich), Dipl.-Ing. P.-O. Damm (ehem. BASF), Dr. W. Haese (Bayer MaterialScience), Dr. R. Furter (ehem. Huber&Suhner), Dr. K. Kurz (Ticona), Dr. U. Lauter (Vinnolit), Dipl.-Ing. E. Maurer (Emaform), Dipl.-Ing. H. Rischgasser (Kunststoff Verband Schweiz), Dr. Martin Roth (Huntsman), Dr. S. Schaaf (ehem. Ems Chemie), Ing. K. Schönenberger (F. Nauer), Dr. H. Vogt (Basell), und Dr. M. Werth (Arkema), deren Kommentare und konstruktive Kritik wesentlich zur Verbesserung des Manuskripts beigetragen haben. Ferner wurde ich bei der Gestaltung des Manuskripts von den Herren Dipl.-Ing. S. Tanner und Dipl.-Chem. F. Choffat unterstützt, welche die chemischen Formeln und Bilder (Zeichnungen) mit dem Computer erstellten.

Zur weiteren Information, insbesondere über Werkstoffeigenschaften und -prüfungen wird auf Hellerich/Harsch/Haenle: Werkstoff-Führer Kunststoffe, Carl Hanser Verlag München, verwiesen. Eine wertvolle Ergänzung bieten die Lehrbücher von Michaeli: Einführung in die Kunststoffverarbeitung und von Menges/Haberstroh/Michaeli/Schmachtenberg: Werkstoffkunde Kunststoffe, beide ebenfalls im Carl Hanser Verlag München erschienen. Desweiteren befindet sich im Anhang eine Gesamtübersicht der vom Autor in diesem Buchberücksichtigten Fachliteratur.

Dem Carl Hanser Verlag sei gedankt für die angenehme und vertrauensvolle Zusammenarbeit, ein spezieller Dank gebührt an dieser Stelle Frau Dr. Chr. Strohm, Herrn Dr. W. Glenz, Frau I. Oberbeil sowie Herrn O. Immel.

Möge das Buch dem geneigten Leser zum Lernen, Lehren, Nachschlagen sowie zur Materialauswahl nützlich sein.

Zürich

Wolfgang Kaiser

Prof. em. Dr. phil. II Wolfgang Kaiser

Wolfgang Kaiser studierte Chemie an der Universität Zürich. Während seiner Promotionszeit wirkte er von 1960 bis 1962 zeitgleich als hauptamtlicher Assistent am dortigen Institut für Organische Chemie. Im Jahr 1963 promovierte er zum Dr. phil. II. Es folgte eine mehrjährige industrielle Tätigkeit in Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet der Additive (J. R. Geigy AG, Basel), danach die Berufung zum Professor an die Fachhochschule Nordwestschweiz (ehemals HTL Brugg-Windisch).

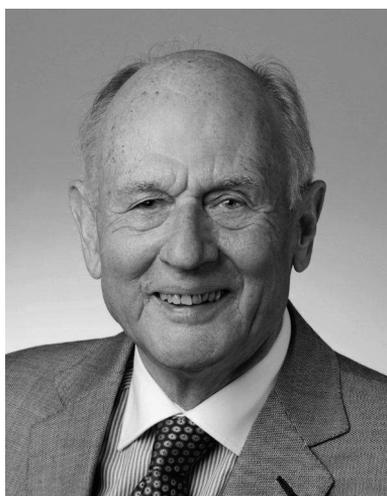
Vor Jahrzehnten formulierte der Autor für seine Studierenden den „Hauptsatz der Kunststofftechnik“:

Polymer-Rohstoff(e) + Additiv(e) → Kunststoff

Dieser erleichtert nach wie vor vielen Ingenieuren den Zugang zu den Kunststoffen als Werkstoffklasse mit eigenen Gesetzmäßigkeiten.

Anlässlich seines 70. Geburtstages wurde Wolfgang Kaiser von der ETH Zürich mit der *Staudinger-Durrer-Medaille* ausgezeichnet. Die Ehrung erfolgte in Anerkennung seiner großen Verdienste auf dem Gebiet der Polymertechnologie. Als „Kunststoff-Kaiser“ prägte er Hunderte von Ingenieuren in Windisch und später auch am Departement für Materialwissenschaften der ETH Zürich. Daneben übernahm er „berufsbegleitend“ den Aufbau und Betrieb des Kunststoff-Ausbildungs- und Technologiezentrums (KATZ) in Aarau und war dessen langjähriger erster Geschäftsführer in Personalunion. Er ist der Begründer einer systematischen kunststofftechnischen Aus- und Weiterbildung für Ingenieure in der Schweiz. Seit 1975 ist er Mitglied im Verein Deutscher Ingenieure, VDI.

Wolfgang Kaiser ist zudem Autor und Coautor zahlreicher wissenschaftlicher Publikationen auf dem Gebiet der Kunststofftechnik.



Hinweise zur Benutzung des Buches

Der Forderung nach möglichst großer Breite versucht das Buch dadurch gerecht zu werden, dass es in den einzelnen Kapiteln leicht verständliche mit ausführlicheren Abschnitten verbindet. Manche Grundbegriffe werden anfangs an einem Beispiel erklärt und in späteren Abschnitten als bekannt vorausgesetzt. Mit fortschreitender Lektüre steigern sich die Anforderungen in Bezug auf kunststoffchemisches Wissen und fachtechnisches Verständnis. Es empfiehlt sich daher, systematisch vorzugehen und den Stoff in der gegebenen Reihenfolge durchzulesen.

Um das nötige Verständnis für die Zusammenhänge zwischen chemischem Aufbau, Eigenschaften, Verarbeitungsverfahren und Anwendung der Endprodukte zu vertiefen, drängte sich eine Erweiterung des Buches um die beiden Kapitel Grundlagen und Technologie der Verarbeitung von Kunststoffen auf.

Für die Beschreibung wichtiger Grundkunststoffe wird regelmäßig folgende Einteilung gewählt: „Das Wichtigste in Kürze“ (inkl. Normen), Handelsnamen (Beispiele), Eigenschaften, Verarbeitung und Anwendung mit Beispielen sowie der Weg zum Kunststoff. Anschließend werden wichtige Modifizierungen des Grundkunststoffs (Copolymerisate, chemische Abwandlungen, Mischungen mit anderen Kunststoffen und Zusatzstoffen) in der annähernd gleichen Einteilung behandelt. Jeweils am Ende der Beschreibung findet sich ein Abschnitt über „Geschichtliches“.

Auf chemische Formeln konnte nicht verzichtet werden. Dabei kann die geneigte Leserin/der geneigte Leser auch die Vorzüge chemischer Gleichungen entdecken, die besonders bei komplexen Reaktionsabläufen unersetzlich sind, da sie ohne lange und umständliche Worterklärungen eine exakte wissenschaftliche Beschreibung ermöglichen. Gleichwohl werden chemische Formeln nur dort wo nötig gebraucht und teilweise vereinfacht dargestellt. So geben die Formelschemata für die Polymere den stereochemischen (räumlichen) Aufbau der Makromoleküle nur in begründeten Ausnahmefällen wieder. Desgleichen wurde auf die in den Ingenieurwissenschaften (noch) nicht allgemein geläufige Darstellung der Molekülstrukturen organischer Verbindungen in Kurzschreibweise (Skelettformel!) weitgehend verzichtet. In gleichem Maße richten sich die sparsam verwendeten chemischen Gleichungen für die Beschreibung der Polymer-Synthesen im Grundsatz nach den im Bereich der Rohstoff-Erzeuger genutzten industriellen Verfahren. Der dadurch gewonnene Einblick in die Chemie der Polymere bleibt so trotz aller Theorie praxisbezogen. Damit hilft es dem Ingenieur die Besonderheiten der Kunststoffe noch besser zu verstehen.

Die Besprechung der Eigenschaften eines Kunststoffs geschieht jeweils unter dem Aspekt seiner hervorstechenden Eigenschaften in wechselnder Reihenfolge zwischen mechanischen, thermischen, optischen, elektrischen und Beständigkeitseigenschaften. Dabei ergänzen Tabellenwerte am Ende eines Kapitels die halbquantitativen Angaben im Text.

Straff geordnet sind die Anwendungsbeispiele für die einzelnen Kunststoffe nach der folgenden Gliederung: Maschinen- und Fahrzeugbau, Elektrotechnik, Bauwesen, Verpackungssektor, Sonstiges (z. B. Medizintechnik, Optik, Chemietechnik, Haushaltgeräte, Folien u. a.). Dies erleichtert dem Ingenieur im Alltag die Suche nach einem geeigneten Werkstoff, z. B. für seine Formteile anhand von Praxisbeispielen, vgl. Abschnitt 1.1.

Kapitel 16 behandelt das Thema: „Gesundheits-, Sicherheits- und Umweltaspekte von Kunststoffen“. Die generelle Bedeutung dieses zwar am Ende des Buches eingeordneten Kapitels verdient aus Sicht des Verfassers eine rechtzeitige Beachtung.

Die vergleichende Beschreibung der prinzipiellen charakteristischen Unterschiede zwischen den Kunststoffen wird durch die Verwendung der genormten Kurzzeichen von Kunststoffen wesentlich vereinfacht und dadurch besser überschaubar. Den Vorteil der abgekürzten Schreibweise macht sich deshalb auch dieses Buch zu Nutze. Dies wiederum setzt beim Leser die Kenntnis dieser meist international vereinbarten Kurzzeichen voraus.

Der nachfolgende Abschnitt vermittelt zu diesem Zweck einen Überblick über die Kennzeichnung von Kunststoffen. Für eine ausführliche Darstellung muss auf die entsprechenden Normen sowie auf die einschlägige Fachliteratur verwiesen werden.

Kennzeichnung von Kunststoffen

Kunststoffe	Die Kunststoffe werden nach den zu ihrer Herstellung verwendeten Monomeren – bei den Homopolymerisaten der Thermoplaste im Regelfall unter Vorsetzen von „Poly-“ – bezeichnet; z. B. Ausgangsmonomer: Methylmethacrylat, Name des Polymeren: Polymethylmethacrylat. Die chemischen Namen der Polymere sind oft sehr lang und für Nichtchemiker schwierig zu handhaben. Daher wurden für die Kunststoffe „Kurzzeichen“ eingeführt, beispielsweise PMMA für vorgenanntes Polymer. Diese sind größtenteils genormt, teilweise aber auch von Herstellerfirmen oder der Praxis in Gebrauch genommen worden. Bei der Angabe von Kurzzeichen wurde nach Möglichkeit auf DIN EN ISO 1043 zurückgegriffen. In Tabelle 01 sind die aktuellen Kurzzeichen für die wichtigsten Kunststoffe aufgeführt. Wegen der Vielfalt der Kunststoffe und ihrer Zusatzstoffe sollen aus den Kurzzeichen aber auch weitergehende Informationen hervorgehen. Zu diesem Zweck existieren weitere Kennbuchstaben für besondere Eigenschaften, die hinter dem Kurzzeichen angeordnet werden dürfen, vgl. Tabelle 02.
Kurzzeichen nach DIN EN ISO 1043	
Copolymere	Copolymere lassen sich in der Regel so kennzeichnen, dass die Kurzzeichen der beteiligten Monomere unter Berücksichtigung ihres Masseanteils als zusammengefügtter Begriff erscheinen, z. B. SB .
Polymerblends	Bei der Kennzeichnung von Polymerblends (Polymermischungen, gelegentlich auch als Polymerlegierungen bezeichnet) findet sich ein Pluszeichen – ohne Leerzeichen und Klammern – direkt zwischen den einzelnen Polymeren, z. B. PC+ABS.
Art und Menge an Zusatzstoffen	Weitere Kennzeichnungen betreffen die Art und Menge an Zusatzstoffen, die sich anhand der DIN EN ISO 1043 durch Teil 2 bis 4 voneinander unterscheiden: Teil 2 Füllstoffe und Verstärkungsstoffe, z. B. PA-GF30 Polyamid mit 30 % Glasfaser, Teil 3 Weichmacher, z. B. PVC-P(20DINP) Weich-PVC mit 20 % Diisononylphthalat, Teil 4 Flammenschutzmittel, z. B. PE-FR(XX) Polyethylen mit Flammenschutz vom Typ XX. Geht es nur um Füllstoffe für Kunststoffe, kommt zusätzlich die DIN 55625 ins Spiel.
Kunststoffe – Umwelt und Recycling	Im Bereich Kunststoffe – Umwelt und Recycling existiert eine ganze Reihe von Normen, deren wichtigste Vertreter an dieser Stelle erwähnt sind, vgl. Abschnitt 17.3.3: Recyclingzeichen nach DIN EN ISO 11469 bei Bedarf mit Werkstoffangaben; ohne Packmittel; vgl. dazu auch VDA 260 , DIN 6120 für Verpackungen aus Kunststoff. Für die Prüfung auf Kompostierbarkeit gemäß DIN EN 13432 und DIN EN 14995 . DIN EN 15343 betrifft Rückverfolgbarkeit und Kunststoffverwertung. Eine exakte Umschreibung von Kunststoffabfällen nach DIN EN 15347 . Das „Schlusslicht“ bildet die DIN EN ISO 14021 , zuständig für Umweltkennzeichnungen und -deklarationen – Umweltbezogene Anbietererklärungen (Umweltkennzeichnung Typ II).

Älter als die Kunststoffe im engeren Sinne, also Thermoplaste und Duroplaste, sind die Elastomere bzw. Kautschuke oder Gummi-Sorten, die eine von den Kunststoffen getrennte Entwicklung in der Kautschukindustrie erlebten und für deren Kurzzeichen eigene, internationale Normen (ISO 1629) gelten. Da viele Kautschuke neben ihrer Verwendung für die Herstellung von Gummiartikeln auch auf dem Kunststoffsektor – vor allem zur Schlagzähmodifizierung – eine Rolle spielen, bestehen für einige Kautschukarten zwei verschiedene Kurzzeichen, einerseits nach DIN EN ISO 1043 und andererseits gemäß ISO 1629. Die Kennzeichnung der **thermoplastischen Elastomere, TPE**, richtet sich nach ISO 18064. Beispiele dazu finden sich bei den Elastomeren in Kapitel 13.

Elastomere
Kurzzeichen
nach DIN ISO
1629

thermo-
plastischen
Elastomere, TPE

Das wichtigste Kriterium für die Normung von **Duroplasten** leitet sich von ihrem äußeren „Erscheinungsbild“ vor der Verarbeitung ab. Somit ergeben sich Harze (R), rieselfähige Formmassen (PMC), Prepregs in unterschiedlicher Form als SMC (Sheet Moulding Compounds), BMC (Bulk Moulding Compounds) und DMC (Dough Moulding Compounds). Die exakte Normierung bezieht sich auf den beteiligten Kunststoff, z.B. **DIN EN ISO 14526** für rieselfähige Phenol-Formmassen (PF-PMC); **DIN EN ISO 3672** für ungesättigte Polyesterharze (UP-R) oder **DIN EN ISO 3673** für Epoxidharze (EP-R). **ISO 8604** befasst sich speziell mit Begriffsdefinitionen und Kurzzeichen für Prepregs.

Duroplasten
Verarbeitung

Sollen besondere Eigenschaften eine Kennzeichnung erhalten, bieten sich analog zu Tabelle 02 für Thermoplaste gleichfalls Kennbuchstaben an.

A Ammoniakfrei	R enthält Recyclinganteile
E elektrische Eigenschaften	T wärmebeständig
FR flammbeständig	X nicht festgelegt
M mechanische Eigenschaften	Z sonstiges
N lebensmittelecht	

Nicht zuletzt steht mit **DIN EN ISO 472** ein dreisprachiges (deutsch, englisch, französisch) **Fachwörterverzeichnis** für Kunststoffe bzw. mit **DIN ISO 1382** für Kautschuke zur Verfügung.

Zur Information über Handelsnamen und deren Firmen wird auf M-Base (www.materialdatacenter.com) verwiesen.

Wo nicht anders vermerkt, wird im Text \bar{M} als Symbol für die mittlere relative Molekülmasse (mittleres Molekulargewicht) und \bar{P} als Symbol für den mittleren Polymerisationsgrad verwendet, vgl. Abschnitt 2.1 und Abschnitt 4.1.7.

Sollten zusätzliche Angaben zum Werkstoffverhalten der Kunststoffe benötigt werden, die nicht aus den im Buch enthaltenen Eigenschaftsvergleichen zu entnehmen sind, bieten sich dafür in erster Linie Werkstoffdatenbanken an. Einige von ihnen sind – sei es online oder offline – kostenfrei zugänglich und ergänzen damit das Buch in idealer Weise.

Ihre Benutzung bietet eine Fülle von Informationen, beispielsweise was die chemischen und physikalischen Eigenschaften oder die chemische Beständigkeit von Kunststoffen betreffen.

chemische
Beständigkeit

Nachfolgend sind alphabetisch (ohne Anspruch auf Vollständigkeit) die Internetadressen häufig benutzter Werkstoff-Datenbanken aufgelistet:

Werkstoff-
Datenbanken

CAMPUSplastics	www.campusplastics.com
Material Data Center – M-Base	www.materialdatacenter.com
MatWeb	www.matweb.com
SpringerMaterials – properties of materials	www.materials.springer.com
Total Materia	www.totalmateria.com

Tabelle 01: Kurzzeichen für wichtige Kunststoffe (nach DIN EN ISO 1043-Teil 1)

Symbol	Kunststoffe	Symbol	Kunststoffe
ABS	Acrylnitril-Butadien-Styrol	PESU	Polyethersulfon
AMMA	Acrylnitril-Methylmethacrylat	PES	Polyethersulfon
ASA	Acrylnitril-Styrol-Acrylat	PET	Polyethylenterephthalat
CA	Celluloseacetat	PET-A	Polyethylenterephthalat, amorph
CAB	Celluloseacetobutyrat	PET-C	Polyethylenterephthalat, kristallin
CAP	Celluloseacetopropionat	PET-G	Polyethylenterephthalat, Glykol-modifiziert
CB	Cellulosebutyrat	PEUR	Polyetherurethan
CF	Kresol-Formaldehyd	PF	Phenol-Formaldehyd-Harz
CN	Cellulosenitrat	PHA	Polyhydroxyalkanoat
COC	Cycloolefin-Copolymer	PHB	Polyhydroxybutyrat
CP	Cellulosepropionat	PI	Polyimid
EAA	Ethylen-Acrylsäure	PIB	Polyisobutylen
EEA	Ethylen-Ethylacrylat	PK	Polyketon
EP	Epoxid-Harz	PLA	Polylactid
E/P	Ethylen-Propylen-Copolymer	PMI	Polymethacrylimid
EIM	Ionomer-Copolymer	PMMA	Polymethylmethacrylat
ECTFE	Ethylen-Chlortrifluorethylen	PMMI	Polymethacrylmethylimid
ETFE	Ethylen-Tetrafluorethylen	PMP	Poly-4-methylpenten-1
EVAC	Ethylen-Vinylacetat	PMPI	Poly-m-phenylenisophthalamid
EVOH	Ethylen-Vinylalkohol	POM	Polyoxymethylen (Polyformaldehyd, Polyacetal)
LCP	Flüssigkristall-Polymer	PP	Polypropylen
MABS	Methacrylat-Acrylnitril-Butadien-Styrol	PPA	Polyphtalamid
MBS	Methacrylat-Butadien-Styrol	PPE	Polyphenylenether
MF	Melamin-Formaldehyd-Harz	PPP	Poly-p-phenylen
MP	Melamin-Phenol-Formaldehyd-Harz	PPS	Polyphenylensulfid
PAEK	Polyaryletherketon	PPSU	Polyphenylensulfon
PAC	Polyacetylen	PPTA	Poly-p-phenylenterephthalamid
PA	Polyamid	PPV	Polyphenylenvinylene
PAI	Polyamidimid	PPY	Polypyrrrol
PAN	Polyacrylnitril	PS	Polystyrol
PANI	Polyanilin	PSAC	Polysaccharid, Stärke
PAR	Polyarylat	PS-E	Polystyrol, expandiert
PARA	Polyarylamid	PS-ST	Polystyrol, syndiotaktisch
PB	Polybuten	PSU	Polysulfon
PBAT	Polybutylenadipat-terephthalat	PT	Polythiophen
PBI	Polybenzimidazol	PTT	Polytrimethylenterephthalat
PBMI	Polybismaleinimid	PTFE	Polytetrafluorethylen
PBS	Polybutylensuccinat	PUR	Polyurethan
PBT	Polybutylenterephthalat	PVAL	Polyvinylalkohol
PC	Polycarbonat	PVAC	Polyvinylacetat
PCL	Polycaprolacton	PVB	Polyvinylbutyrat
PCTFE	Polychlortrifluorethylen	PVC	Polyvinylchlorid
PDAP	Polydiallylphthalat	PVC-C	Polyvinylchlorid, nachchloriert
PE	Polyethylen (Polyethen)	PVDC	Polyvinylidenchlorid
PE-C	Polyethylen, chloriert	PVF	Polyvinylfluorid
PE-X	Polyethylen, vernetzt	PVDF	Polyvinylidenfluorid
PEBA	Polyether-Block-Amid	SB	Styrol-Butadien
PEEK	Polyetheretherketon	SMS	Styrol- α -Methylstyrol
PEI	Polyetherimid	SAN	Styrol-Acrylnitril
PEK	Polyetherketon	SI	Silikon
PEN	Polyethylennaphthalat	TPE	Thermoplastische Elastomere
PEOX	Polyethylenoxid		
PESI	Polyesterimid		

Tabelle 01: Kurzzeichen für wichtige Kunststoffe (nach DIN EN ISO 1043-Teil 1)

Symbol	Kunststoffe	Symbol	Kunststoffe
TPA	– auf Basis Polyamid	UF	Urea-Formaldehyd
TPC	– auf Basis Copolyester	UP	(Harnstoff-Formaldehyd) Harz
TPO	– auf Basis von Olefinen	VCE	Ungesättigtes Polyesterharz
TPS	– auf Basis Styrol	VCEVAC	Vinylchlorid-Ethylen
TPU	– auf Basis Polyurethan		Vinylchlorid-Ethylen-Vinylacetat
TPV	– auf Basis von vernetztem Kautschuk		
TPZ	weitere thermoplastische Elastomere		

Tabelle 02: Kennbuchstaben für besondere Eigenschaften¹⁾ (nach DIN EN ISO 1043-Teil 1)

Symbol	Bedeutung	Symbol	Bedeutung
A	amorph, Säure (modifiziert), ataktisch	N	normal, nukleiert, Novolak
B	bromiert, Block, biaxial	O	orientiert
C	chloriert, kristallin, isotaktisch	P	weichmacherhaltig, thermoplastisch, plastifiziert
D	Dichte	R	erhöht, Resol, Random, hart
E	expandiert, verschäumt	S	gesättigt, sulfoniert, duroplastisch
F	flexibel, flüssig, fluoriert	ST	syndiotaktisch
G	Glykol (modifiziert)	T	Temperatur(beständig), thermoplastisch, zähmodifiziert
H	hoch, Homopolymer	U	ultra, weichmacherfrei, ungesättigt, unplastifiziert
I	schlagzäh, Impact	V	sehr
L	niedrig, linear	W	Gewicht, Weight
M	mittel, molekular	X	vernetzt, vernetzbar

¹⁾ Davon abweichend sind international Kennbuchstaben auch vor dem Kurzzeichen zu finden, z. B. HDPE.

Beispiele:

PA6	Polyamid aus ϵ -Caprolactam
PA66	Polyamid aus Hexamethyldiamin und Adipinsäure
PE-LLD	lineares Polyethylen niedriger Dichte
PE-UHMW	ultrahochmolekulares Polyethylen
PET-A	amorphes Polyethylenterephthalat
PET (REC50)	Polyethylenterephthalat mit 50 % Rezyklatanteil
PE-X	vernetztes Polyethylen
PVC-C	chloriertes Polyvinylchlorid
PVC-U	weichmacherfreies PVC
PVC-P	weichmacherhaltiges PVC
PP-R	Polypropylen Random -Copolymer
PS-(H)I	schlagzähes Polystyrol

Inhalt

Vorwort zur sechsten Auflage	V
Vorwort zur ersten Auflage	VII
Prof. em. Dr. phil. II Wolfgang Kaiser	IX
Hinweise zur Benutzung des Buches.	XI
1 Einführung	1
1.1 Werkstoffklassen	1
1.1.1 Werkstoffauswahl bei Kunststoffen.	2
1.1.2 Internationale Vereinbarungen/Normen – die geheimen Helfer.	3
1.1.3 Werkstoffdatenbanken	4
1.2 Bedeutung der Kunststoffe	4
1.2.1 Wachstumsursachen	4
1.2.1.1 Die Petrochemie als Rohstofflieferant	5
1.2.1.2 Leichtgewicht Kunststoff	6
1.2.1.3 Energiegünstiges Verhalten	6
1.2.1.4 Komplexe Formteilgeometrien und hoher Automatisierungsgrad	7
1.2.1.5 Nutzung von Synergien	7
1.2.1.6 Hohe Wertschöpfung des Erdöls	8
1.2.2 Kunststoffe und die Grundbedürfnisse des Menschen	8
1.2.2.1 Nahrung	8
1.2.2.2 Bekleidung	9
1.2.2.3 Wohnung	9
1.2.2.4 Gesundheit	9
1.2.2.5 Soziale Bedürfnisse	10
1.3 Geschichte der Kunststoffe	11
1.3.1 Kurzer Abriss der Entwicklung der Polymerwissenschaften (ohne Copolymere und Blends)	14
1.4 Zukunft der Kunststoffe – Prognosen	25
1.4.1 Zukünftiger Pro-Kopf-Verbrauch von Kunststoff- Werkstoffen.	26
1.4.2 Erwartungen an Polymere	27

1.4.3	Zukünftige Rohstoffquellen	29
1.5	Wirtschaftsdaten und Grafiken zu Kunststoffen	31
1.5.1	Einteilung der Kunststoffproduktion nach Typ und Bedarf in Einsatzgebieten	31
1.5.2	Europe (EU 28) Entwicklung der Beschäftigtenzahl	33
1.5.3	Einteilung der Kunststoffe nach ihrem Eigenschaftsprofil.	34
2	Grundlagen.	37
2.1	Was sind Kunststoffe	38
2.1.1	Einteilung der Kunststoffe	41
2.1.2	Makromolekül-Architektur/Topologie.	42
2.2	Bildungsreaktionen für Makromoleküle – Polyreaktionen	45
2.2.1	Kettenpolymerisation	46
2.2.1.1	Radikalische Kettenpolymerisation	47
2.2.1.2	Kationische Kettenpolymerisation	51
2.2.1.3	Anionische Kettenpolymerisation	52
2.2.1.4	Koordinative Kettenpolymerisation/Polyinsertion	54
2.2.1.5	Homo- und Copolymerisate	55
2.2.1.6	Chemische Vernetzung durch Kettencopolymerisation	57
2.2.1.7	Verfahrenstechnik der Kettenpolymerisation	57
2.2.1.8	Plasmapolymerisation	62
2.2.2	Kondensationspolymerisation (Polykondensation)	62
2.2.3	Additionspolymerisation (Polyaddition)	67
2.2.4	Verfahrenstechnik der Kondensationspolymerisation und Additionspolymerisation	68
2.2.5	Einteilung nach dem Typ der Aufbaureaktionen	69
2.2.6	Chemische Umsetzungen an Makromolekülen	70
2.2.6.1	Vergrößerung des Polymerisationsgrads	70
2.2.6.2	Beibehaltung des Polymerisationsgrads	70
2.2.6.3	Verringerung des Polymerisationsgrads	71
2.2.6.4	Chemische Umsetzungen an makromolekularen Naturstoffen	71
2.3	Bindungskräfte in makromolekularen Systemen	72
2.3.1	Hauptvalenzbindungen	72
2.3.2	Nebervalenzbindungen	75
2.3.3	Ionenbindungen	79
2.3.4	Mechanische Bindungen	79

2.4	Strukturmerkmale von Kunststoffen	80
2.4.1	Chemische Struktur	81
2.4.1.1	Konstitution	81
2.4.1.2	Konfiguration	87
2.4.2	Festkörperstruktur	89
2.4.2.1	Räumliche Anordnung eines Makromoleküls	89
2.4.2.2	Räumliche Anordnung mehrerer Makromoleküle zu einem Verband	90
2.4.2.3	Kristallinität	93
2.4.3	Mittlere Molmasse \bar{M} und Molmassenverteilung	95
2.4.3.1	Kettenlänge	95
2.4.3.2	Molmasse M bei niedermolekularen Verbindungen	96
2.4.3.3	Mittlere Molmasse \bar{M} und Molmassenverteilung bei hochmolekularen Verbindungen	96
2.4.3.4	Mittlerer Polymerisationsgrad	98
2.4.3.5	Beeinflussung von Eigenschaften durch die mittlere Molmasse	99
2.5	Modifizierung von Polymeren und Kunststoffen	100
2.5.1	Chemisches Modifizieren von Polymeren	100
2.5.1.1	Steuerung von Synthesereaktionen	100
2.5.1.2	Copolymerisation	101
2.5.1.3	Andere chemische Modifikationen	101
2.5.2	Physikalische Modifizierung von Polymeren und Kunststoffen	101
2.5.2.1	Polymergemische und Polymerblends	101
2.5.2.2	Erhöhung der Ordnung in Polymeren	102
2.5.3	Modifizieren mit Zusatzstoffen (Additive)	104
2.5.3.1	Füllstoffe	105
2.5.3.2	Verstärkungsstoffe	106
2.5.3.3	Weichmacher	107
2.5.3.4	Treibmittel	107
2.5.3.5	Farbmittel	107
2.5.3.6	Stabilisatoren	108
2.5.3.7	Flammhemmende Zusätze	109
2.5.3.8	Weitere Additivgruppen	109
2.6	Wichtige Eigenschaften der Kunststoffe	111
2.6.1	Fließverhalten (Rheologie) von Kunststoff-Schmelzen	111
2.6.1.1	Viskositätsfunktionen von Thermoplastschmelzen	113

2.6.1.2	Zeitverhalten von thermisch instabilen Thermoplast-Schmelzen und reagierenden Formmassen.	115
2.6.2	Thermisch-mechanisches Verhalten	117
2.6.2.1	Thermoplaste.	117
2.6.2.2	Elastomere und Duroplaste	120
2.6.3	Chrono-mechanisches Verhalten	122
2.6.4	Verhalten gegen Umwelteinflüsse	125
2.6.4.1	Chemische Beständigkeit	125
2.7	Alterung und Alterungsschutz.	128
2.7.1	Alterung und Alterungsvorgänge	128
2.7.1.1	Chemische Alterungsvorgänge	128
2.7.1.2	Physikalische Alterungsvorgänge	131
2.7.2	Alterungsschutz	131
2.8	Wichtige Aspekte bei der Schadenverhütung und Schadensanalyse im Kunststoffbereich	135
2.8.1	Thermoanalyse (TA) zur Schadenverhütung/ Schadensanalyse.	136
2.8.1.1	Differential-Kalorimetrie (Differential-Scanning-Calorimetry), DSC	137
2.8.2	Mikroskopische Gefügeanalyse an Bauteilen und Halbzeug.	139
3	Technologie der Ver- und Bearbeitung von Kunststoffen	143
3.1	Allgemeines.	143
3.2	Begriffe und Einteilung der Fertigungsverfahren nach DIN 8850	143
3.2.1	Prinzip der wichtigsten Ver- und Bearbeitungsverfahren.	146
3.3	Pathologische Technologie	146
3.3.1	Pathologie eines Werkstoffs, Beispiel Kunststoff	146
3.3.2	Chemische Reaktionen bei der Ver- und Bearbeitung von Kunststoffen	147
3.3.2.1	Chemische Reaktionen im Aufgabenbereich des Verarbeiters.	148
3.3.2.2	Kunststofferzeugung beim Verarbeiter	149
3.4	Aufbereitung/Compoundierung	150
3.4.1	Maschinenhersteller (Beispiele [®]).	152
3.4.2	Einteilung der Aufbereitungsverfahren	152
3.4.2.1	Orientierung an den Materialflüssen.	152
3.4.2.2	Dosieren und Mischen	152
3.4.2.3	Granulieren	155

	3.4.2.4	Zerkleinern	155
	3.4.2.5	Vortrocknen	156
	3.4.3	Pathologischer Befund bei den Aufbereitungsverfahren	156
3.5	Urformen		159
	3.5.1	Extrudieren (Strangpressen)	160
	3.5.1.1	Aufbau eines Extruders	161
	3.5.1.2	Hersteller von Extrusionsanlagen (Beispiele [®])	165
	3.5.1.3	Beispiele typischer Extrusionsanlagen	165
	3.5.2	Blasformen	168
	3.5.2.1	Extrusionsblasformen	169
	3.5.2.2	Extrusions-Streckblasformen	171
	3.5.2.3	Spritzblasformen	172
	3.5.2.4	Spritz-Streckblasformen	172
	3.5.3	Spritzgießen	173
	3.5.3.1	Hersteller von Spritzgießmaschinen (Beispiele [®])	173
	3.5.3.2	Verfahrenstechnik beim Spritzgießen	173
	3.5.3.3	Spritzgießmaschine	175
	3.5.3.4	Einflussgrößen auf die Formteilqualität beim Spritzgießen	176
	3.5.3.5	Sonderverfahren der Spritzgießtechnik	178
	3.5.3.6	Spritzgießen von vernetzenden Polymeren	182
	3.5.4	Pressen, Spritzpressen, Schichtpressen	183
	3.5.4.1	Formpressen von Duroplasten	183
	3.5.4.2	Pressen von Thermoplasten	185
	3.5.4.3	Spritzpressen von Duroplasten	185
	3.5.4.4	Schichtpressen von Duroplasten	185
	3.5.5	Kalandrieren	186
	3.5.5.1	Hersteller von Kalandernanlagen (Beispiele [®])	186
	3.5.5.2	Bauarten des Kalanders	186
	3.5.5.3	Verfahrenstechnik beim Kalandrieren	187
	3.5.6	Spinnverfahren	188
	3.5.6.1	Grundlagen des Spinnprozesses	189
	3.5.6.2	Herstellung von Chemiefasern	189
	3.5.6.3	Textile Definitionen	195
	3.5.6.4	Textile Flächengebilde	196
	3.5.7	Faserverbundkunststoff (FVK)-Urformen	197
	3.5.7.1	Prepregverarbeitung	197
	3.5.7.2	Faserspritzen	198
	3.5.7.3	Faserwickeln	198

	3.5.7.4	Pultrusion	199
	3.5.7.5	RTM-Verfahren	199
	3.5.7.6	Handlaminieren	200
3.5.8		Schäumen	201
	3.5.8.1	Herstellung eines Schaumstoffes	203
	3.5.8.2	Einteilung der Schäumverfahren	204
	3.5.8.3	Polystyrol-Schaumstoffe	204
	3.5.8.4	Polyurethan-Schaumstoffe	206
3.5.9		Gießen	212
	3.5.9.1	Vakuumgießen	213
	3.5.9.2	Rotationsformen (Rotationsgießen)	215
	3.5.9.3	Schleuderverfahren (Schleudergießen)	215
	3.5.9.4	Filmgießen (Foliengießen)	215
	3.5.9.5	Einbetten, Imprägnieren, Tränken	216
3.5.10		Tauchformen	216
3.5.11		Additive Fertigungsverfahren AF/Additive Manufacturing AM	216
	3.5.11.1	Das Wichtigste in Kürze über AF	216
	3.5.11.2	Allgemeines und Begriffserläuterungen	217
	3.5.11.3	Verfahren auf der Basis flüssig/pastös als Ausgangsform	218
	3.5.11.4	Verfahren mit Pulver als Ausgangsform	220
	3.5.11.5	Verfahren mit Granulat als Ausgangsform (AKF)	220
	3.5.11.6	Verfahren mit Filamenten als Ausgangsform	220
	3.5.11.7	Verfahren mit Folien als Ausgangsform	221
	3.5.11.8	Verfahren mit polymeren Gels als Ausgangsform	222
3.5.12		Pathologischer Befund beim Urformen	222
3.6		Umformen	225
	3.6.1	Hersteller von Thermoformmaschinen (Beispiele [®])	225
	3.6.2	Unterschiede im Warmformbereich zwischen amorphen und teilkristallinen Thermoplasten	226
	3.6.3	Einteilung der Warmformverfahren für Thermoplaste	226
	3.6.3.1	Biegeumformen	226
	3.6.3.2	Zugumformen	227
	3.6.3.3	Zugdruckumformen	227
	3.6.3.4	Kombinierte Verfahren	227
	3.6.4	Verfahrenstechnik beim Warmformen	228
	3.6.5	Thermoformmaschinen	230
	3.6.6	Pathologischer Befund beim Umformen	231
	3.6.7	Vor- und Nachteile des Warmformens	233

3.7	Trennen (Spanen)	233
3.8	Fügen	235
3.8.1	Schweißen	235
3.8.1.1	Hersteller von Schweißmaschinen für Thermoplaste	235
3.8.1.2	Grundlagen	236
3.8.1.3	Schweißverfahren (Auswahl)	238
3.8.1.4	Pathologischer Befund beim Schweißen	240
3.8.2	Kleben	241
3.8.2.1	Grundlagen	241
3.8.2.2	Abbindemechanismus der Klebung	243
3.8.2.3	Verfahrenstechnik	244
3.8.2.4	Arbeitsicherheit und Schutzmaßnahmen beim Umgang mit Klebstoffen	244
3.8.3	Mechanische Verbindungen	244
3.9	Beschichten	245
3.9.1	Einteilung der Beschichtungsverfahren	245
3.9.2	Streichverfahren	245
3.9.3	Pulverbeschichten	247
3.10	Veredeln	247
3.10.1	Lackieren von Kunststoffen	248
3.10.2	Bedrucken von Kunststoffen	248
3.10.3	Laserbeschriften	250
3.10.4	Heißprägen	250
3.10.5	Metallisieren	250
3.10.6	Beflocken	252
3.10.7	Plasmabeschichten	252
3.10.8	Tempern	253
3.10.9	Konditionieren	254
3.10.10	Bestrahlen	254
4	Polyolefine	257
4.1	Polyethylen (PE)	257
4.1.1	Das Wichtigste in Kürze	257
4.1.2	Handelsnamen (Beispiele [®])	257
4.1.3	Eigenschaften	258
4.1.4	Verarbeitung und Anwendung	259
4.1.5	Anwendungsbeispiele	260
4.1.6	Der Weg zum Polyethylen	261
4.1.6.1	Hochdruckverfahren	261

	4.1.6.2	Niederdruckverfahren	262
4.1.7		Der molekulare Aufbau des Polyethylens	265
	4.1.7.1	Polyethylene mit multimodaler Molmassenverteilung	266
	4.1.7.2	Ethylen-Copolymere mit α -Olefinen.	267
	4.1.7.3	Metallocen-katalysierte Ethylencopolymere (PE-MC)	268
4.2		Chemische Modifikation von Polyethylen	269
	4.2.1	Abwandlung durch Vernetzen	269
	4.2.2	Abwandlung durch chemische Veränderungen	270
	4.2.3	Weitere Ethylen-Copolymere	271
	4.2.3.1	Unpolare Ethylen-Copolymere	271
	4.2.3.2	Polare Ethylen-Copolymere	272
4.3		Polypropylen (PP)	277
	4.3.1	Das Wichtigste in Kürze	277
	4.3.2	Handelsnamen (Beispiele [®])	277
	4.3.3	Eigenschaften	278
	4.3.4	Verarbeitung und Anwendung	279
	4.3.5	Anwendungsbeispiele	279
	4.3.6	Der Weg zum Polypropylen	280
	4.3.7	Der molekulare Aufbau von Polypropylen	281
	4.3.7.1	Isotaktisches Polypropylen (iPP)	282
	4.3.7.2	Syndiotaktisches Polypropylen (sPP)	282
	4.3.7.3	Ataktisches Polypropylen (aPP)	283
4.4		Modifikation von Polypropylen	283
	4.4.1	PP-Copolymere	283
	4.4.2	Gefüllte und verstärkte Polypropylene	284
	4.4.3	Chemische Modifikation am fertigen PP-Polymer	285
4.5		Polyisobutylen (PIB)	285
	4.5.1	Handelsnamen (Beispiele [®])	285
	4.5.2	Eigenschaften	285
	4.5.3	Verarbeitung (Beispiele)	286
	4.5.4	Anwendungsbeispiele	286
	4.5.5	Der Weg zum Polyisobutylen	286
4.6		Polybuten-1 (PB-1)	287
	4.6.1	Handelsnamen (Beispiele [®])	287
	4.6.2	Eigenschaften, Verarbeitung und Anwendung	287
	4.6.3	Der Weg zum Polybuten-1	288
4.7		Poly-4-methylpenten-1 (PMP)	288
	4.7.1	Handelsnamen (Beispiel [®])	288

4.7.2	Eigenschaften	288
4.7.3	Verarbeitung (Beispiele)	289
4.7.4	Anwendungsbeispiele	289
4.7.5	Der Weg zum Poly-4-methylpenten-1	289
4.8	Geschichtliches	290
4.9	Tabellarischer Eigenschaftsvergleich	291
5	Halogenierte Kunststoffe I	295
5.1	Hart-PVC (Hart-Polyvinylchlorid), PVC-U (weichmacherfreies Polyvinylchlorid)	295
5.1.1	Das Wichtigste in Kürze über Hart-PVC	295
5.1.2	Handelsnamen (Beispiele [®])	296
5.1.3	Eigenschaften	296
5.1.4	Verarbeitung (Beispiele)	297
5.1.5	Anwendungsbeispiele	298
5.1.6	Der Weg zum Polyvinylchlorid	298
5.2	Modifizierte Vinylchlorid-Polymere	302
5.2.1	Copolymere aus Vinylchlorid und anderen Comonomeren	303
5.2.1.1	Einteilung	303
5.2.1.2	Eigenschaften, Verarbeitung und Anwendung	304
5.2.1.3	Die Herstellung von Vinylchlorid-Copolymeren	304
5.2.2	Besonders schlagfestes Polyvinylchlorid (PVC-HI)	305
5.2.2.1	Eigenschaften, Verarbeitung und Anwendung	305
5.2.2.2	Der Weg zum besonders schlagfesten Polyvinylchlorid	305
5.2.3	Chloriertes Polyvinylchlorid (PVC-C)	306
5.2.3.1	Eigenschaften, Verarbeitung und Anwendung	306
5.2.3.2	Der Weg zum chlorierten Polyvinylchlorid	307
5.3	Weich-PVC / PVC-P / weichgemachtes Polyvinylchlorid	307
5.3.1	Das Wichtigste in Kürze über Weich-PVC	307
5.3.2	Handelsnamen (Beispiele [®])	308
5.3.3	Eigenschaften	308
5.3.4	Verarbeitung (Beispiele)	309
5.3.5	Anwendungsbeispiele	309
5.3.6	Die Herstellung von Weich-Polyvinylchlorid	310
5.3.6.1	Weichmacher	310
5.3.6.2	Einarbeitung von Weichmachern	312
5.4	Chloriertes Polyethylen (PE-C)	314
5.4.1	Handelsnamen (Beispiele [®])	314

5.4.2	Eigenschaften, Verarbeitung und Anwendung	314
5.4.3	Der Weg zum chlorierten Polyethylen	314
5.5	Polyvinylidenchlorid (PVDC)	316
5.5.1	Das Wichtigste in Kürze	316
5.5.2	Handelsnamen (Beispiele [®])	316
5.5.3	Eigenschaften, Verarbeitung und Anwendung von Vinylidenchlorid-Copolymerisaten	316
5.5.4	Der Weg zu den Vinylidenchlorid-Copolymerisaten	317
5.6	Geschichtliches	317
5.7	Tabellarischer Eigenschaftsvergleich	318
6	Polystyrol-Kunststoffe	321
6.1	Das Wichtigste in Kürze über Polystyrol-Kunststoffe	321
6.2	Polystyrol (PS)	322
6.2.1	Handelsnamen (Beispiele [®])	322
6.2.2	Ataktisches Polystyrol	322
6.2.2.1	Eigenschaften	322
6.2.2.2	Verarbeitung (Beispiele)	323
6.2.2.3	Anwendungsbeispiele	323
6.2.2.4	Der Weg zum Polystyrol	323
6.2.3	Stereoreguläre Polystyrole	325
6.3	Modifizierte Styrolpolymere (Abschnitt 6.4 bis 6.8)	326
6.4	Styrol-Acrylnitril-Copolymerisat (SAN)	327
6.4.1	Handelsnamen (Beispiele [®])	327
6.4.2	Eigenschaften und Verarbeitung	327
6.4.3	Anwendungsbeispiele	328
6.4.4	Der Weg zum Styrol-Acrylnitril	328
6.5	Schlagzäh modifiziertes Polystyrol (PS-I) (Styrol-Butadien SB)	329
6.5.1	Handelsnamen (Beispiele [®])	329
6.5.2	Eigenschaften	329
6.5.3	Verarbeitung (Beispiele)	330
6.5.4	Anwendungsbeispiele	330
6.5.5	Der Weg zum schlagzähem Polystyrol	330
6.6	Acrylnitril-Butadien-Styrol-Polymerisate (ABS)	333
6.6.1	Handelsnamen (Beispiele [®])	334
6.6.2	Eigenschaften	334
6.6.3	Verarbeitung (Beispiele)	334
6.6.4	Anwendungsbeispiele	334
6.6.5	Der Weg zum Acrylnitril-Butadien-Styrol	335

6.7	Schlagzähe Acrylnitril-Styrol-Formmassen (ASA, AES, ACS)	337
6.7.1	Handelsnamen (Beispiele [®])	337
6.7.2	Eigenschaften, Verarbeitung und Anwendung von Acrylnitril-Styrol-Acrylat (ASA)	337
6.7.3	Der Weg zum Acrylnitril-Styrol-Acrylat	338
6.8	Blends	339
6.8.1	PS-I + PPE Blends	339
6.8.2	ABS + PC bzw. ASA + PC Blends	339
6.8.3	ABS + PA Blends	340
6.8.4	PS + PE Blends	340
6.9	Geschichtliches zu den Styrolpolymeren	340
6.10	Tabellarischer Eigenschaftsvergleich	342
7	Ester-Thermoplaste	347
7.1	Ester-Gruppe in der Hauptkette	348
7.1.1	Polyalkylenterephthalate („gesättigte“ Polyester) (PET, PBT) und Polyethylnaphthalat (PEN)	348
7.1.1.1	Das Wichtigste in Kürze über Polyalkylenterephthalate	348
7.1.1.2	Der Weg zu den Polyalkylenterephthalaten	348
7.1.1.3	Polyethylenterephthalat (PET)	350
7.1.1.4	Polybutylenterephthalat (PBT)	352
7.1.1.5	Polytrimethylenterephthalat (PTT)	353
7.1.1.6	Modifizierte Polyalkylenterephthalate	353
7.1.1.7	Polyethylnaphthalat (PEN)	354
7.1.1.8	Geschichtliches	355
7.1.2	Polycarbonat (PC)	356
7.1.2.1	Das Wichtigste in Kürze über Polycarbonat	356
7.1.2.2	Handelsnamen (Beispiele [®])	356
7.1.2.3	Eigenschaften	356
7.1.2.4	Verarbeitung (Beispiele)	357
7.1.2.5	Anwendungsbeispiele	357
7.1.2.6	Der Weg zum Polycarbonat	357
7.1.2.7	Modifizierte Polycarbonate	359
7.1.2.8	Geschichtliches	362
7.1.3	Polyestercarbonat (PEC)	362
7.1.3.1	Das Wichtigste in Kürze	362
7.1.3.2	Handelsnamen (Beispiele [®])	362
7.1.3.3	Eigenschaften	362
7.1.3.4	Verarbeitung (Beispiele)	363

	7.1.3.5	Anwendungsbeispiele	363
	7.1.3.6	Der Weg zu Polyestercarbonat.	363
	7.1.3.7	Geschichtliches	364
7.2		Ester in der Seitenkette	364
	7.2.1	Polymethylmethacrylat (PMMA)	364
	7.2.1.1	Das Wichtigste in Kürze.	364
	7.2.1.2	Handelsnamen (Beispiele [®])	364
	7.2.1.3	Eigenschaften.	364
	7.2.1.4	Verarbeitung (Beispiele)	365
	7.2.1.5	Anwendungsbeispiele	365
	7.2.1.6	Der Weg zum Polymethylmethacrylat.	365
	7.2.1.7	Modifizierte Methylmethacrylate und Derivate	366
	7.2.1.8	Geschichtliches	368
7.3		Celluloseester (CA, CB, CP, CAB, CAP)	369
	7.3.1	Das Wichtigste in Kürze.	369
	7.3.2	Handelsnamen (Beispiele [®])	369
	7.3.3	Eigenschaften.	369
	7.3.4	Verarbeitung (Beispiele)	370
	7.3.5	Anwendungsbeispiele	370
	7.3.6	Der Weg zu den Celluloseestern	370
	7.3.6.1	Der Ausgangsstoff Cellulose.	370
	7.3.6.2	Chemische Umsetzungen an Cellulose	371
	7.3.7	Geschichtliches.	372
7.4		Tabellarischer Eigenschaftsvergleich	373
8		Stickstoff-Thermoplaste	381
	8.1	Polyamide (PA)	381
	8.1.1	Teilkristalline aliphatische Polyamide	381
	8.1.1.1	Das Wichtigste in Kürze.	381
	8.1.1.2	Handelsnamen (Beispiele [®])	383
	8.1.1.3	Eigenschaften.	384
	8.1.1.4	Verarbeitung (Beispiele)	385
	8.1.1.5	Anwendungsbeispiele	386
	8.1.1.6	Der Weg zu den teilkristallinen aliphatischen Polyamiden	386
	8.1.1.7	Wasserstoffbrücken (H-Brücken)	390
	8.1.2	Modifizierte teilkristalline aliphatische Polyamide.	391
	8.1.2.1	Chemische Modifizierung.	391
	8.1.2.2	Physikalische Modifizierung.	391
	8.1.2.3	Anwendungsbeispiele	392

8.1.3	Cycloaliphatische Polyamide	392
8.1.3.1	Das Wichtigste in Kürze	392
8.1.3.2	Handelsnamen (Beispiele [®])	393
8.1.3.3	Eigenschaften	393
8.1.3.4	Verarbeitung (Beispiele)	393
8.1.3.5	Anwendungsbeispiele	393
8.1.3.6	Der Weg zu den cycloaliphatischen Polyamiden	394
8.1.4	Teilaromatische Polyamide	394
8.1.4.1	Das Wichtigste in Kürze	394
8.1.4.2	Handelsnamen (Beispiele [®])	396
8.1.4.3	Eigenschaftsprofil im Vergleich zu Standard-Polyamiden	396
8.1.4.4	Verarbeitung (Beispiele)	396
8.1.4.5	Anwendungsbeispiele	396
8.1.4.6	Der Weg zu den teilaromatischen Polyamiden	397
8.1.5	Modifizierung von teilaromatischen Polyamiden	398
8.1.6	Biopolyamide (Bio-PA)	398
8.1.7	Geschichtliches	399
8.2	Polyacrylnitril PAN	400
8.2.1	Das Wichtigste in Kürze	400
8.2.2	Handelsnamen (Beispiel [®])	400
8.2.3	Eigenschaften von Polyacrylnitril-Barriere- Kunststoffen	400
8.2.4	Verarbeitung und Anwendung (Beispiele)	401
8.2.5	Der Weg zu Polyacrylnitril-Barriere-Kunststoffen	401
8.2.6	PAN-Fasertransformation zu Kohlenstofffasern (C-Fasern)	402
8.2.7	Geschichtliches	403
8.3	Tabellarischer Eigenschaftsvergleich	403
9	Acetal- und Ether-Thermoplaste	411
9.1	Polyoxymethylen (Polyacetal) (POM)	412
9.1.1	Das Wichtigste in Kürze	412
9.1.2	Handelsnamen (Beispiele [®])	412
9.1.3	Eigenschaften	412
9.1.4	Verarbeitung (Beispiele)	413
9.1.5	Anwendungsbeispiele	413
9.1.6	Der Weg zum Polyoxymethylen	414
9.1.6.1	POM-Homopolymerisat (POM-H)	414
9.1.6.2	POM-Copolymerisate (POM-C)	415

9.1.6.3	Eigenschaftsunterschiede zwischen POM-Homo- und Copolymerisaten	416
9.1.7	Modifizierte Polyoxymethylen-Polymerisate	416
9.1.8	Biopolyoxymethylen (Bio-POM)	417
9.1.8.1	Handelsnamen (Beispiele [®])	417
9.1.8.2	Der Weg zum Bio-POM	417
9.1.9	Geschichtliches	418
9.2	Polyphenylenether (PPE)	418
9.2.1	Das Wichtigste in Kürze	418
9.2.2	Handelsnamen (Beispiele [®])	418
9.2.3	Eigenschaften	418
9.2.4	Verarbeitung (Beispiele)	419
9.2.5	Anwendungsbeispiele	419
9.2.6	Der Weg zum Polyphenylenether	420
9.2.7	Weitere modifizierte Polyphenylenether	421
9.2.8	Geschichtliches	421
9.3	Tabellarischer Eigenschaftsvergleich	421
10	Halogenierte Kunststoffe II	425
10.1	Polytetrafluorethylen (PTFE)	425
10.1.1	Das Wichtigste in Kürze	425
10.1.2	Handelsnamen (Beispiele [®])	425
10.1.3	Eigenschaften	425
10.1.4	Verarbeitung (Beispiele)	426
10.1.5	Anwendungsbeispiele	427
10.1.6	Der Weg zum Polytetrafluorethylen	428
10.2	Thermoplastisch verarbeitbare Fluor-Kunststoffe	430
10.2.1	Das Wichtigste in Kürze	431
10.2.2	Fluorthermoplaste und Beispiele [®] von Handelsnamen	431
10.2.3	Eigenschaften	432
10.2.4	Verarbeitung (Beispiele)	432
10.2.5	Anwendungen	432
10.2.5.1	Spezielle Anwendungsbeispiele	432
10.2.6	Der Weg zu den thermoplastisch verarbeitbaren Fluor-Kunststoffen	433
10.2.6.1	Perfluorethylenpropylen FEP, auch Tetrafluorethylen-Hexafluorpropylen-Copolymer	434
10.2.6.2	Perfluoroalkoxy-Copolymer (PFA)	434
10.2.6.3	Ethylen-Tetrafluorethylen-Copolymer (ETFE)	434
10.2.6.4	Polyvinylidenfluorid (PVDF)	435

10.2.6.5	Tetrafluorethylen-Hexafluorpropylen-Vinylidenfluorid-Terpolymer TFEHFPVDF (THV)	435
10.2.6.6	Polyvinylfluorid (PVF).....	435
10.2.6.7	Polychlortrifluorethylen (PCTFE).....	436
10.2.6.8	Ethylen-Chlortrifluorethylen-Copolymer (ECTFE).....	436
10.3	Geschichtliches zu den Fluorpolymeren	436
10.4	Tabellarischer Eigenschaftsvergleich	437
11	Duroplaste.....	441
11.1	Allgemeines über Herstellung und Eigenschaften	441
11.2	Phenoplaste (Phenol-Formaldehyd-Kondensationsharze) (PF)	443
11.2.1	Das Wichtigste in Kürze	443
11.2.2	Handelsnamen (Beispiele [®])	444
11.2.3	Eigenschaften von PF-Formstoffen.....	444
11.2.4	Verarbeitung (Beispiele)	446
11.2.5	Anwendungsbeispiele	446
11.2.5.1	Harzformstoffe, Harzformteile	446
11.2.5.2	Schichtpressstoffe	446
11.2.5.3	PF-Harze	446
11.2.6	Der Weg zu den Phenolharzen.....	447
11.2.7	Geschichtliches	451
11.3	Aminoplaste	451
11.3.1	Harnstoffharze (Harnstoff-Formaldehyd-Kondensationsharze) (UF)	451
11.3.1.1	Das Wichtigste in Kürze	451
11.3.1.2	Handelsnamen (Beispiele [®])	451
11.3.1.3	Eigenschaften	452
11.3.1.4	Verarbeitung, Anwendung (Beispiele).....	452
11.3.1.5	Der Weg zum Harnstoffharz.....	452
11.3.2	Melaminharze (Melamin-Formaldehyd-Kondensationsharze) (MF)	454
11.3.2.1	Das Wichtigste in Kürze	454
11.3.2.2	Handelsnamen (Beispiele [®])	454
11.3.2.3	Eigenschaften	454
11.3.2.4	Verarbeitung, Anwendung (Beispiele).....	455
11.3.2.5	Eigenschaften und Anwendung von modifizierten Melaminharzen (Beispiele)	455
11.3.2.6	Der Weg zum Melaminharz	456

11.3.3	Geschichtliches	457
11.4	Reaktionsharz-Duroplaste	458
11.4.1	Ungesättigte Polyesterharze (UP).....	458
11.4.1.1	Das Wichtigste in Kürze.....	458
11.4.1.2	Handelsnamen (Beispiele [®]).....	458
11.4.1.3	Eigenschaften.....	458
11.4.1.4	Verarbeitung (Beispiele).....	460
11.4.1.5	Anwendungsbeispiele	461
11.4.1.6	Der Weg zu den ungesättigten Polyesterharzen	461
11.4.1.7	Geschichtliches	465
11.4.2	Vinylesterharze (VE).....	465
11.4.2.1	Eigenschaften.....	465
11.4.2.2	Verarbeitung, Anwendung (Beispiele).....	465
11.4.2.3	Der Weg zu den Vinylesterharzen.....	466
11.4.2.4	Geschichtliches	467
11.4.3	Epoxidharze (EP)	467
11.4.3.1	Das Wichtigste in Kürze.....	467
11.4.3.2	Handelsnamen (Beispiele [®]).....	467
11.4.3.3	Eigenschaften.....	467
11.4.3.4	Verarbeitung (Beispiele).....	468
11.4.3.5	Anwendungsbeispiele	468
11.4.3.6	Der Weg zu den Epoxidharzen	469
11.4.3.7	Geschichtliches	474
11.5	Sonstige Harze	475
11.5.1	Siliconharze	475
11.5.2	Polydiallylphthalatharze (PDAP, PDAIP)	476
11.5.2.1	Das Wichtigste in Kürze.....	476
11.5.2.2	Handelsnamen (Beispiele [®]).....	476
11.5.3	PUR-Gießharze	476
11.5.3.1	Elastomer-Gießharze.....	476
11.5.3.2	Harte PUR-Harze	477
11.5.4	Cyanatesterharze	477
11.6	Tabellarischer Eigenschaftsvergleich	478
12	Hochleistungspolymere	481
12.1	Polyaryletherketone (PAEK)	482
12.1.1	Das Wichtigste in Kürze.....	482
12.1.2	Handelsnamen (Beispiele [®]).....	482
12.1.3	Eigenschaften.....	482

12.1.4	Verarbeitung (Beispiele)	483
12.1.5	Anwendungsbeispiele	484
12.1.6	Der Weg zu den Polyaryletherketonen.	484
12.1.7	Geschichtliches	484
12.2	Polyarylate (PAR)	485
12.2.1	Das Wichtigste in Kürze	485
12.2.2	Handelsnamen (Beispiele [®])	485
12.2.3	Eigenschaften	485
12.2.4	Verarbeitung (Beispiele)	486
12.2.5	Anwendungsbeispiele	486
12.2.6	Der Weg zu den Polyarylaten	487
12.2.7	Geschichtliches	487
12.3	Flüssigkristalline Polymere (LCP)	488
12.3.1	Das Wichtigste in Kürze	488
12.3.2	Handelsnamen (Beispiele [®])	488
12.3.3	Eigenschaften	488
12.3.3.1	Aufbau und Struktur der LCP	488
12.3.3.2	Eigenschaften von thermotropen LCP	489
12.3.4	Verarbeitung (Beispiele)	491
12.3.5	Anwendungsbeispiele	491
12.3.6	Der Weg zu den flüssigkristallinen Polymeren	491
12.3.6.1	Herstellung der lyotropen LCP	491
12.3.6.2	Herstellung der thermotropen LCP	493
12.3.7	Geschichtliches	494
12.4	Polyimide (PI)	494
12.4.1	Das Wichtigste in Kürze	494
12.4.2	Handelsnamen (Beispiele [®])	494
12.4.3	Eigenschaften	494
12.4.4	Verarbeitung (Beispiele)	496
12.4.5	Anwendungsbeispiele	496
12.4.6	Der Weg zu den Polyimiden	497
12.4.7	Geschichtliches	502
12.5	Polyarylsulfone (PSU, PES, PPSU)	503
12.5.1	Das Wichtigste in Kürze	503
12.5.2	Handelsnamen (Beispiele [®])	503
12.5.3	Eigenschaften	503
12.5.4	Verarbeitung (Beispiele)	504
12.5.5	Anwendungsbeispiele	504
12.5.6	Der Weg zu den Polyarylsulfonen	504
12.5.7	Geschichtliches	506

12.6	Polyphenylensulfid (PPS).....	506
12.6.1	Das Wichtigste in Kürze.....	506
12.6.2	Handelsnamen (Beispiele [®]).....	506
12.6.3	Eigenschaften.....	506
12.6.4	Verarbeitung (Beispiele).....	507
12.6.5	Anwendungsbeispiele.....	507
12.6.6	Der Weg zu Polyphenylensulfid.....	508
12.6.7	Geschichtliches.....	508
12.7	Tabellarischer Eigenschaftsvergleich.....	508
13	Elastomere.....	513
13.1	Permanent vernetzte Elastomere/Gummi.....	514
13.1.1	Das Wichtigste in Kürze über vernetzte Elastomere.....	514
13.1.2	Handelsnamen (Beispiele [®]).....	516
13.1.3	Eigenschaften.....	518
13.1.4	Verarbeitung (Beispiele).....	518
13.1.5	Anwendungsbeispiele.....	519
13.1.6	Der Weg zu den permanent vernetzten Elastomeren.....	519
13.1.7	Geschichtliches.....	522
13.2	Reversibel vernetzte Elastomere/ Thermoplastische Elastomere TPE.....	522
13.2.1	Das Wichtigste in Kürze über TPE.....	522
13.2.2	Handelsnamen (Beispiele [®]).....	524
13.2.3	Allgemeine Eigenschaften.....	524
13.2.4	Einzeleigenschaften und Anwendungsbeispiele.....	527
13.2.4.1	Thermoplastische Elastomere auf Olefinbasis, TPE-O/TPE-V.....	527
13.2.4.2	Thermoplastische Elastomere auf Styrolbasis, TPE-S.....	528
13.2.4.3	Thermoplastische Polyester-Elastomere, TPE-E.....	528
13.2.4.4	Thermoplastische Polyamid-Elastomere, TPE-A.....	529
13.2.4.5	Thermoplastische Polyurethan-Elastomere, TPE-U (TPU).....	529
13.2.5	Der Weg zu den thermoplastischen Elastomeren.....	530
13.2.5.1	TPE-O/TPE-V.....	531
13.2.5.2	TPE-S.....	531
13.2.5.3	TPE-E.....	531
13.2.5.4	TPE-A.....	532
13.2.5.5	TPE-U (TPU).....	532

13.2.6	Geschichtliches	532
14	Schaumstoffe	533
14.1	Allgemeines über Herstellung und Eigenschaften	533
14.1.1	Handelsnamen (Beispiele [®])	536
14.2	Polystyrol-Schaumstoffe (PS-E)	536
14.2.1	Das Wichtigste in Kürze	536
14.2.2	Polystyrol-Hartschaumstoff, Partikel-Schaumstoff	536
14.2.2.1	Eigenschaften	536
14.2.2.2	Verarbeitung	537
14.2.2.3	Anwendungsbeispiele	537
14.2.3	Polystyrol-Hartschaumstoff, Extruder-Schaumstoff	537
14.2.3.1	Eigenschaften	537
14.2.3.2	Verarbeitung	537
14.2.3.3	Anwendungsbeispiele	537
14.2.4	Polystyrol-Integralschaumstoff	537
14.2.4.1	Eigenschaften	537
14.2.4.2	Verarbeitung (Beispiele)	538
14.2.4.3	Anwendungsbeispiele	538
14.3	Polyolefin-Schaumstoffe, PO-Schaumstoffe	538
14.3.1	Das Wichtigste in Kürze	538
14.3.2	Eigenschaften	538
14.3.3	Verarbeitung (Beispiele)	539
14.3.4	Anwendungsbeispiele	539
14.4	Polyurethan-Schaumstoffe, PUR-Schaumstoffe	539
14.4.1	Das Wichtigste in Kürze	539
14.4.2	PUR-Hartschaumstoffe, (PUR-H)	540
14.4.2.1	Eigenschaften	540
14.4.2.2	Anwendungsbeispiele	540
14.4.3	PUR-Weichschaumstoffe, (PUR-W)	540
14.4.3.1	Eigenschaften	540
14.4.3.2	Anwendungsbeispiele	541
14.4.4	PUR-Halbhart-(semiflexible) Schaumstoffe	541
14.4.4.1	Eigenschaften	541
14.4.4.2	Anwendungsbeispiele	541
14.4.5	PUR-Integral-Hartschaumstoffe, (PUR-I)	541
14.4.5.1	Eigenschaften	541
14.4.5.2	Anwendungsbeispiele	541
14.4.6	PUR-Integral-Halbhart- und Weichschaumstoffe	542

14.4.6.1	Eigenschaften	542
14.4.6.2	Anwendungsbeispiele	542
14.4.7	Der Weg zu den Polyurethan-Schaumstoffen	542
14.4.7.1	Polyurethan-Schäumsysteme	542
14.4.7.2	Chemie der PUR-Schäumsysteme	545
14.4.8	Isocyanatfreie Polyurethane (NIPU) NIPU, Non-Isocyanat-Polyurethan	548
14.4.8.1	Biobasierte NIPU-Schäume	549
14.4.9	Geschichtliches	549
14.5	Weitere Schaumstoffe	550
14.5.1	Polyvinylchlorid-Schaumstoffe	550
14.5.2	Phenol-Formaldehyd-Schaumstoffe	550
14.5.3	Harnstoff-Formaldehyd-Schaumstoffe	550
14.5.4	Polymethacrylimid-Schaumstoffe	550
14.5.5	Gummi-Schaumstoffe	551
14.6	Tabellarischer Eigenschaftsvergleich	552
15	Kunststoffe als Sonderwerkstoffe	553
15.1	Elektroaktive Kunststoffe	553
15.1.1	Oberflächenbehandlungen	554
15.1.2	Elektrisch leitfähige Compounds	554
15.1.3	Intrinsisch elektrisch leitfähige Polymere	555
15.1.4	Polymere als Elektrete	557
15.1.5	Ferroelektrische Polymere (Piezo- und Pyroelektrizität)	558
15.1.6	Triboelektrizität (Reibungselektrizität)	559
15.2	Funktionskunststoffe	560
15.2.1	Polymere als Datenspeicher	560
15.2.2	Polymere Leuchtdioden, Polymer-LEDs (PLEDs)	561
15.2.3	Polymere Photovoltaik (PPV)	562
15.2.4	Photoresists	564
15.2.5	Brennstoffzellen	565
15.2.6	Hybride Polymersysteme	566
15.3	Nanotechnologie und Kunststoffe	567
15.3.1	Anwendung von Nanoröhren (CNT) als Zusatzstoffe für Kunststoffe	568
15.3.2	Graphen	568
15.3.3	Nanotechnologie als Schrittmacher in die Zukunft	569
15.4	Kunststoffe in der Medizintechnik	570
15.4.1	Exemplarische Beispiele aus der Chirurgie	570
15.4.1.1	Poly lactide (PLA)	570

15.4.2	Scaffolds für Tissue Engineering.....	570
15.5	Biopolymere.....	571
15.5.1	Das Wichtigste in Kürze.....	571
15.5.2	Biokunststoffe – Kunststoffe aus nachwachsenden (biogenen) Rohstoffen (NAWARO).....	572
15.5.2.1	Handelsnamen (Beispiele [®]).....	572
15.5.2.2	Cellulosewerkstoffe.....	572
15.5.2.3	Stärkewerkstoffe.....	573
15.5.2.4	Werkstoffe aus dem Bioreaktor.....	575
15.5.2.5	Werkstoffe durch chemische Synthese biobasierter Rohstoffe.....	576
15.5.2.6	Biocomposites als Werkstoffe.....	580
15.5.2.7	Blends als Werkstoffe.....	580
15.5.3	Biologisch abbaubare Kunststoffe (BAK).....	580
15.5.3.1	Biokunststoffe neu definiert.....	582
15.5.4	Anwendungsbeispiele und Ausblick.....	582
15.6	Gele.....	583
15.6.1	Aufbau der festen Struktur.....	583
15.6.1.1	Nebenvalenzbindungen/Nebenvalenzgele.....	584
15.6.1.2	Hauptvalenzbindungen/Hauptvalenzgele.....	584
15.6.2	Anwendungsbeispiele.....	584
15.6.2.1	Hydrogele als Funktionspolymere.....	584
15.7	Tabellarischer Eigenschaftsvergleich.....	585
16	Gesundheits-, Sicherheits- und Nachhaltigkeitsaspekte.....	587
16.1	Das Wichtigste in Kürze.....	587
16.2	Gesundheits- und Sicherheitsaspekte von Kunststoffen.....	587
16.2.1	Gewerbetoxikologische Begriffe (Auswahl).....	587
16.2.2	Herstellung von Polymeren und Kunststoff-Formmassen....	588
16.2.3	Verarbeitung und Prüfung von Kunststoffen.....	589
16.2.4	Anwendung von Kunststoffen.....	589
16.3	Nachhaltigkeitsaspekte.....	590
16.3.1	Nachhaltige Entwicklung.....	590
16.3.2	Sustainable Development Goals (SDGs).....	591
16.3.2.1	Kunststoffe und ihr Beitrag zu den SDGs.....	591
16.3.2.2	Kunststoffe als Hilfsmittel im Unterricht.....	592
16.3.2.3	Lebensdauer von Erzeugnissen aus Kunststoff.....	592
16.3.3	Kunststoffverpackungen – ihr Beitrag zur Nachhaltigkeit....	593
16.3.3.1	Ausgangslage.....	593
16.3.3.2	Kreislaufwirtschaft durch Verwertung.....	594

17 Recycling und Umweltschutz	595
17.1 Das Wichtigste in Kürze	595
17.2 Recycling	595
17.2.1 Abfall- und Recyclinghierarchie	595
17.2.2 Abfallwirtschaft und Recycling aus Sicht der Kunststoffindustrie	596
17.2.2.1 Abfallwirtschaft	596
17.2.2.2 Kunststoffabfälle 2021	596
17.2.3 Grundsätzliche Aspekte beim Recycling von Kunststoffen ...	596
17.2.4 Recyclingkreisläufe von Kunststoffen	598
17.2.4.1 Werkstoffliches Recycling	599
17.2.4.2 Rohstoffliches Recycling	602
17.2.4.3 Kontrollierte energetische Verwertung („energy“) ..	605
17.3 Umweltschutz	612
17.3.1 Deponie	612
17.3.2 Littering alias Vermüllung	613
17.3.3 Codierung erleichtert Recycling	614
17.3.4 Recyclinggerechte Konstruktion	615
17.3.4.1 Recyclinggerechtes Konstruieren mit Kunststoffen ...	615
17.3.5 Abbaufähige, resorbierbare Kunststoffe	615
17.3.5.1 Biologisch abbaubare Kunststoffe (BAK)	616
17.3.5.2 Photoabbaubare Kunststoffe	616
17.3.5.3 Wasserlösliche Polymere	617
17.4 Zusammenfassung und Ausblick	617
17.4.1 Ausblick	618
18 Literaturverzeichnis	619
Sachwortverzeichnis	625

1 Einführung

*Alles Wissen stammt aus der Erfahrung.
Immanuel Kant*

1.1 Werkstoffklassen

Als Werkstoffe werden alle festen Materialien wie Holz, Stahl, NE-Metalle, Leder, Steine, Glas, Keramik, Kunststoffe bezeichnet, die sich zur Herstellung von Werkstücken, beispielsweise Maschinenteilen und Gebrauchsgegenständen eignen.

Eine Einteilung der Werkstoffe nach den Kriterien anorganisch, organisch, natürlich und synthetisch zeigt Bild 1.1. Wie dieser Darstellung zu entnehmen ist, zählen außer den Kunststoffen auch die technisch genutzten Metalle sowie Glas und Keramik zu den synthetischen Werkstoffen. Die Herstellung dieser Materialien wird demnach maßgeblich durch synthetische, d. h. durch chemisch-technische Prozesse bestimmt (z. B. Redox-Reaktionen zur Entfernung des Sauerstoffs aus den Erzen). Aluminium und Stahl sind demzufolge als synthetisch-anorganische Werkstoffe zu definieren, Kunststoffe entsprechend als synthetisch-organische Werkstoffe. Eine andere Definition für Kunststoffe geht davon aus, dass diese Materialien in irgendeiner Phase ihrer Verarbeitung plastische Zustände durchlaufen (griechisch: plastikos, formen/formbar). Von diesem Merkmal eines plastischen Zustands leitet sich in den meisten anderen Sprachen der Name für die im Deutschen als Kunststoffe bezeichneten Werkstoffe ab, beispielsweise *plastics* (engl.); *matières plastiques* (franz.); *materie plastiche* (ital.); *plastico* (span.).

synthetisch-
organische
Werkstoffe

plastics

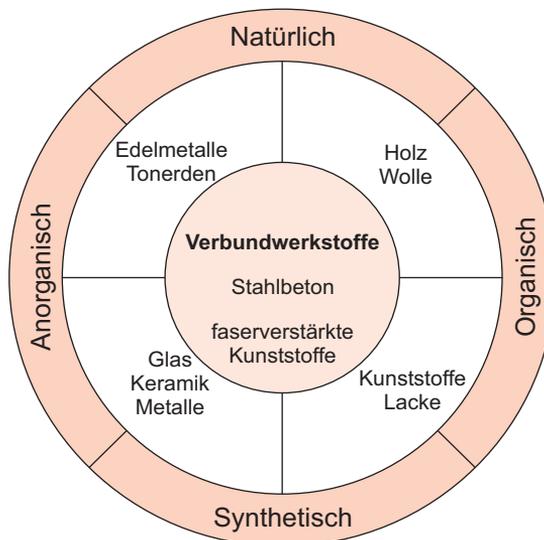


Bild 1.1: Werkstoffklassen (schematisch)

1.1.1 Werkstoffauswahl bei Kunststoffen

Die Eignung als Werkstoff wird in der Praxis für alle Werkstoffklassen vor allem durch ihr Eigenschaftsspektrum bestimmt. In Bild 1.2 sind beispielhaft einige Eigenschaftsgruppen zusammengestellt, die als Auswahlkriterien bei der Suche nach einem geeigneten Werkstoff eine zentrale Rolle spielen. Dazu kommen weitere Überlegungen, z. B. ökonomischer und ökologischer Art oder bezüglich der Gesetzgebung. Nur in den seltensten Fällen wird es daher gelingen den anvisierten „Ideal-Werkstoff“ zu finden. Wie an praktischen Beispielen leicht zu erkennen ist, müssen demzufolge sehr oft Kompromisse bei der Wahl eines Werkstoffs eingegangen werden. Auch hier gilt eben die goldene Regel: „Nur so gut wie nötig, nicht so gut wie möglich“.

„Nur so gut wie nötig, nicht so gut wie möglich.“

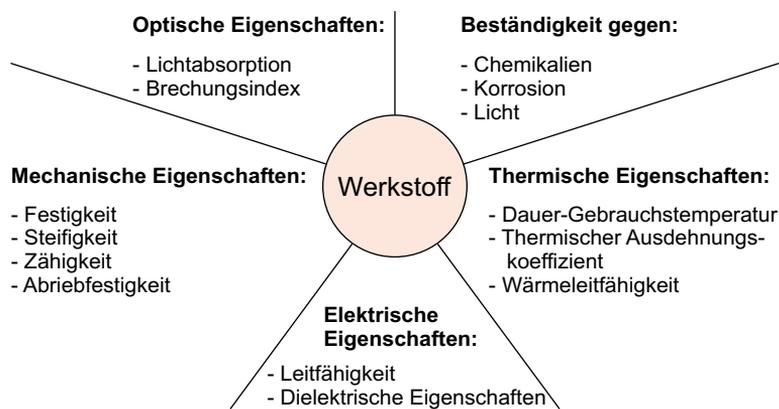


Bild 1.2: Eigenschaftsspektrum von Werkstoffen (Auswahl)

Indes erfordern die Besonderheiten, die bei der Werkstoffauswahl von Kunststoffen auftreten, nebst dem bisher Gesagten das Hauptaugenmerk vorrangig auf die thermischen Eigenschaften sowie auf die physikalisch/chemische Beständigkeit gegen Einflüsse von außen zu lenken. Nicht umsonst trägt die größte Gruppe innerhalb der Kunststoffe die Bezeichnung *Thermoplaste*. Eine ebenso wichtige Erkenntnis beruht auf der Tatsache, dass die Eigenschaften einer Kunststoff-Formmasse nur einen Teil der Güte eines Bauteils oder Halbzeugs aus Kunststoff bestimmen. Die Erklärung dazu liefert der *Hauptsatz der Kunststofftechnik*, vgl. Abschnitt 2.5.3. Dahinter verbirgt sich die Komplexität, im gegenseitig voneinander abhängigen Zusammenspiel zwischen Eigenschaften, Konstruktion/Gestaltung und Verarbeitung zum Bauteil bzw. Halbzeug.

Bild 1.3 zeigt zu diesem Zweck in einer Übersicht den schematischen Ablauf bis zur endgültigen Werkstoffauswahl in Kombination mit einer kunststoffgerechten Konstruktion/Gestaltung (inkl. Werkzeug), z. B. eines spritzgegossenen Formteils („Spritzling“).

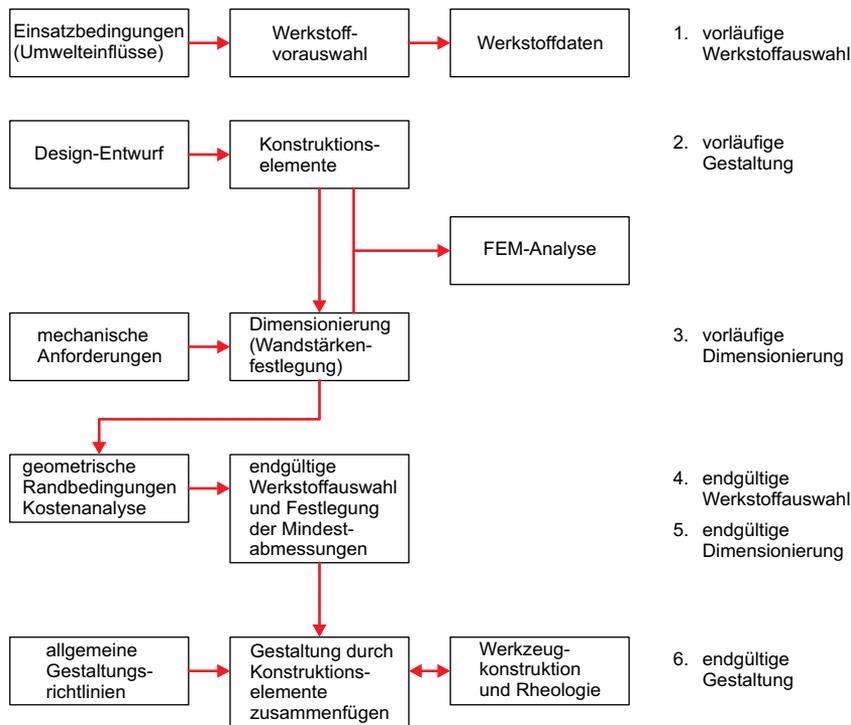


Bild 1.3: Vorgehensweise bei der Werkstoffauswahl eines spritzgegossenen Formteils
Quelle: VDI-K

1.1.2 Internationale Vereinbarungen/Normen – die geheimen Helfer

Wie im Abschnitt *Hinweise zur Benutzung des Buches* bereits erwähnt (Seite XI bis XV), findet sich eine Auflistung der wichtigsten Normen für einen Kunststofftyp jeweils am Anfang des betreffenden Kapitels, vgl. Kapitel 4 bis 15. Geht es um die aktuellen Normen für das Recycling von Kunststoffen sei auf Kapitel 17 verwiesen.

Überdies besteht für viele Bereiche der Technik (Automobilbranche, Bahnwesen, Elektrogeräte, Luftfahrt u. a.) die Möglichkeit sich vor der Werkstoffauswahl und/oder der Bewertung (Evaluation) eines Kunststoffes anhand bereits existierender Materialdatenblätter (Material Data Sheets) zu orientieren. Exemplarisch sei dies im Bereich der Automobilindustrie und die damit gegebenen Möglichkeiten aufgezeigt. Grundlage dafür bildet zunächst die Norm VDA 260, „Kraftfahrzeuge – Kennzeichnung von Bauteilen aus polymeren Werkstoffen“. Parallel dazu lässt sich das „International Material Data System“ (IMDS) nutzen, ein weltweit standardisiertes Austausch- und Verwaltungssystem für Materialdaten, an dem sich aktuell 35 Automobilhersteller und 120'000 Lieferanten/Zulieferer beteiligen.

1.1.3 Werkstoffdatenbanken

Werkstoffauswahl (teils in Kombination mit Konstruktion) gehören gewissermaßen zur Kernkompetenz dieser nützlichen Einrichtungen. Gerade im Kunststoffbereich erweisen sie sich seit Jahrzehnten als unverzichtbare Begleiter bei der täglichen Arbeit. Dieser zentralen Bedeutung entsprechend findet sich im Abschnitt *Hinweise zur Benutzung des Buches* eine Auflistung wichtiger Anbieter sowohl auf nationaler als auch internationaler Ebene.

1.2 Bedeutung der Kunststoffe

Wenn im Jahr 2021 rund 391 Mio. t Kunststoffe weltweit produziert wurden (davon entfallen etwa 57 Mio. t auf Europa), so spricht diese Zahl für sich selbst. Was sind die Ursachen für das gigantische Wachstum dieser Werkstoffklasse über die letzten Jahrzehnte?

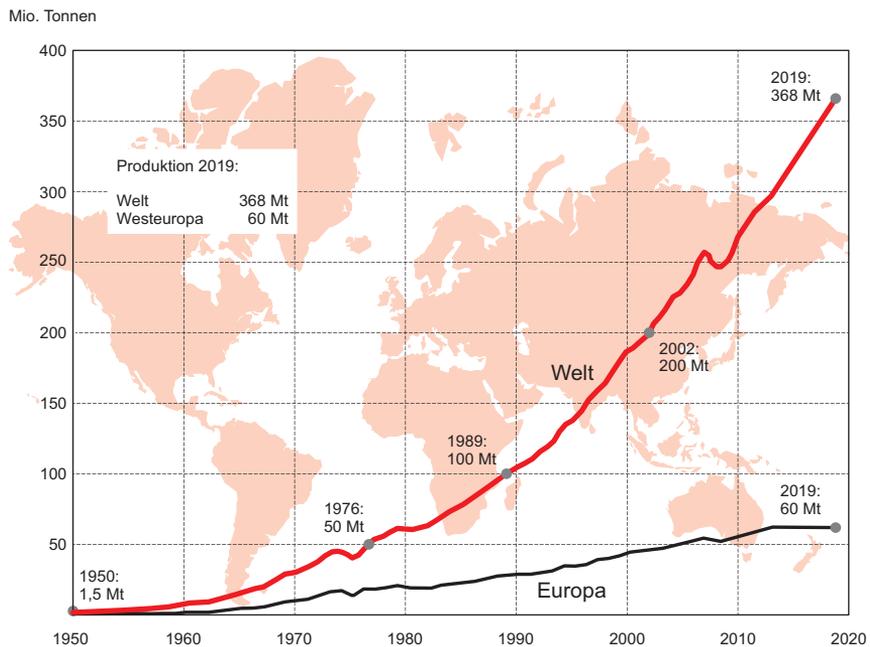


Bild 1.4: Weltweite und europäische Produktionsmengen von Kunststoffen 1950 bis 2019. Die Energie- und Finanzkrise hinterlassen eine spürbare Delle (Mengenangaben Thermoplaste, Polyurethane und Duroplaste inkl. Klebstoffe, Beschichtungen, Dichtungsmaterial und PP-Fasern).

Quelle: **PlasticsEurope, Business Data and Charts 2019**

1.2.1 Wachstumsursachen

Eine erste und zugleich triviale Erklärung, die gerne übersehen wird ist die Koinzidenz mit der Wachstumskurve der Menschheit im selben Zeitabschnitt, vgl. Bild 1.5.

Der Bedarf nach mehr Materialien in dieser Zeitperiode, verursacht vor allem durch das *weltweite Wachstum* der Bevölkerung (Stand 2022: 8 Mia.) und den *zunehmenden Wohlstand* in vielen Ländern, bot dem Werkstoff Kunststoff die einmalige Gelegenheit sich für viele Bereiche als das ideale Material für eine Massenproduktion zu profilieren, vgl. 1.2.1.4. Eine vertiefte Analyse weist zudem auf die Tatsache hin, dass die Generation der über 60-jährigen auf der ganzen Welt – insbesondere in den Entwicklungsländern – weiterhin stark anwachsen wird.

zunehmender Wohlstand

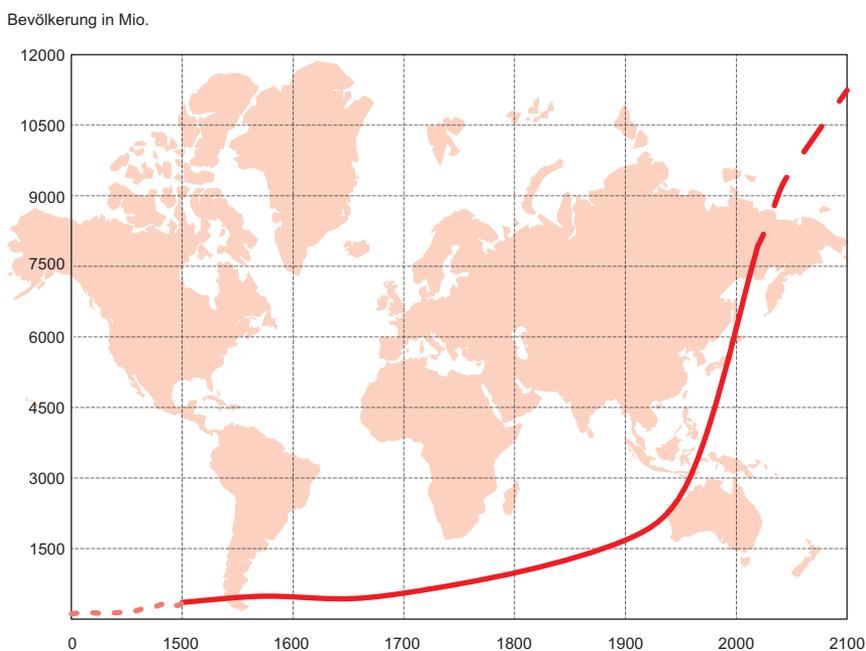


Bild 1.5: Wachstum der Weltbevölkerung zwischen **1950** und **2019** von **2.53 Milliarden** auf **7,71 Milliarden** Menschen

Davon losgelöst und das Augenmerk nur auf den Werkstoff Kunststoff gelenkt, geraten für dieses Wachstum zusätzliche Blickwinkel in den Vordergrund, die nachfolgend beschrieben werden.

1.2.1.1 Die Petrochemie als Rohstofflieferant

Obwohl langfristig aus Sicht der Chemie neben Erdgas und Erdöl durchaus auch realistische Alternativen zur großtechnischen Erzeugung von Kunststoffen vorhanden sind, bleibt bis auf Weiteres die Petrochemie aus Kostengründen der wichtigste Rohstofflieferant. Für einen „Kunststöffler“ schmerzt indes der weltweite Jahresverbrauch an Erdöl, der sich im Jahr 2018 auf *4,6 Milliarden Tonnen* belief, wovon nur etwa 5% für die Erzeugung von Kunststoffen Verwendung fanden. Demgegenüber beansprucht die Erzeugung von Energie und/oder Wärme (Verkehr, Heizung etc.) jährlich rund 90% des Erdöls, verwandelt sich dabei förmlich in „Luft“, hinterlässt keine verwertbaren Recyclingprodukte und verschwendet damit in riesigen Mengen unwiederbringlich – zumindest bis in naher Zukunft – einen kostbaren Rohstoff. Auch

Erzeugung von Energie
jährlich rund
90% des Erdöls

schwarzes Gold

als schwarzes Gold bezeichnet wäre die Menschheit besser beraten mit dem Erdöl sparsamer umzugehen. Künftigen Generationen bliebe so die Möglichkeit erhalten es sinnvoller zu nutzen, z. B. für die chemische Industrie (Arzneimittel, Kunststoffe etc.).

1.2.1.2 Leichtgewicht Kunststoff

Gewichts-
vergleich

Die häufigsten am Aufbau der Kunststoffe beteiligten chemischen Elemente sind Kohlenstoff (C) und Wasserstoff (H). Dabei kommt dem Wasserstoff das Privileg zu, dass seine Atome die absolut geringste Massenzahl besitzen. Werden beispielsweise die Wasserstoffatome im Polyethylen (PE) vollständig durch Fluoratome ersetzt, so entsteht in der Folge Polytetrafluorethylen (PTFE). Die Dichte erhöht sich dabei von vergleichsweise ca. 0,96 auf 2,20 kg/dm³.

Noch drastischer fällt der Vergleich aus, wenn die angenommene mittlere Dichte der Kunststoffe von 1,2 kg/dm³ der von Eisenwerkstoffen mit 7,8 kg/dm³ gegenübergestellt wird.

Da Bauteile häufig ein gegebenes Volumen berücksichtigen müssen (z. B. Verpackungen), resultiert daraus gegenüber anderen Werkstoffklassen ein kostenreduzierendes geringeres Gewicht für die Kunststoffe. So beträgt beim Transport von Joghurt mit Lastwagen der Verpackungsanteil bei Glas 36 %, beim Einsatz von Kunststoffbechern lediglich 4 % des gesamten Transportgewichts, vgl. Bild 1.6.

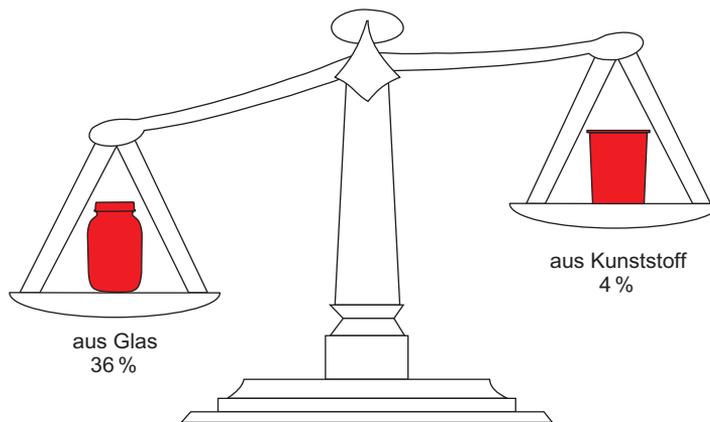


Bild 1.6: Verpackungsanteil bei Joghurtbechern

Quelle: SwissPlastics

1.2.1.3 Energiegünstiges Verhalten

Volumenbezogen bleibt der Maßstab, wenn es darum geht, einen aussagekräftigen Vergleich im Hinblick auf den Energiebedarf für die Herstellung einzelner Werkstoffe zu finden, vgl. Bild 1.7.

Zudem lassen sich verschiedene Kunststoffe aufgrund ihrer chemischen Struktur, z. B. Polyethylen (PE), aus Kohlenstoff- und Wasserstoffatomen aufgebaut, als zusätzliche Energiespeicher definieren, da sie bei der Verbrennung zur Energiegewinnung genutzt werden können, vgl. Abschnitt 17.2.4.3.

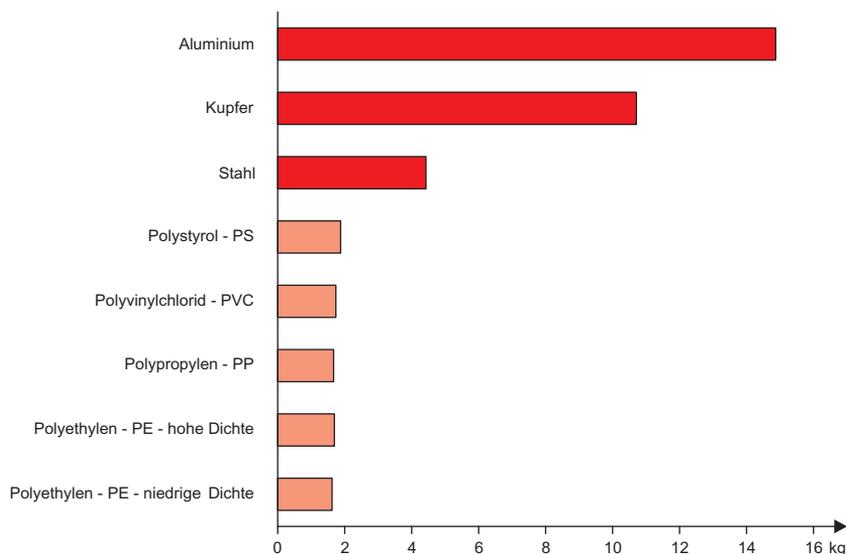


Bild 1.7: Energiebedarf für die Herstellung von Werkstoffen gemessen in kg Erdöläquivalent bezogen auf 1 dm³ (1 Liter) Materialvolumen

Quelle: *Argumentarium GKV*

1.2.1.4 Komplexe Formteilgeometrien und hoher Automatisierungsgrad

Durch die üblicherweise im Schmelzzustand stattfindende Formgebung (Urformen) lassen sich bei gleichzeitig hohem Stand des Werkzeug- und Formenbaus sowie rascher vollautomatischer Fertigungsprozesse Bauteile resp. Halbzeuge mit komplexen Formteilgeometrien in großer Stückzahl herstellen. Daraus resultieren kostengünstige Massenproduktionen, bei denen die relativ niedrigen Verarbeitungstemperaturen (im Mittel ca. 200 bis 300 °C) zusätzlich Kosten sparend in Erscheinung treten. Auch entfällt in der Regel eine kostspielige und zeitraubende Nacharbeit von Oberflächen sowie deren Schutz durch Lackieren. Einfärbungen werden zudem bereits im Schmelzzustand vorgenommen.

niedrige
Verarbeitungs-
temperaturen

1.2.1.5 Nutzung von Synergien

Neben so wichtigen Eigenschaften wie Flexibilität, Transparenz, gutes elektrisches und thermisches Isoliervermögen, hohe chemische Beständigkeit, die von Kunststoffen im Einzelfall erwartet werden, besticht seit längerem auch ihre Eignung als Funktionswerkstoffe. Dies bedeutet, dass das betreffende Kunststoffbauteil zusätzlich zu seiner ursprünglichen Funktion weitere Aufgaben in Eigenregie übernimmt. Beispiele finden sich u. a. bei Kunststoffen für optische Anwendungen, biologisch abbaubaren Polymeren (Medizin, Verpackung) sowie auf dem Gebiet der intrinsisch leitfähigen Kunststoffe, vgl. Kapitel 15.

Funktions-
werkstoffe

1.2.1.6 Hohe Wertschöpfung des Erdöls

bei der
Synthese zu
Kunststoffen

Abschließend sei auf die hohe Wertschöpfung hingewiesen, die das Erdöl bei der Synthese zu Kunststoffen gewinnt. Durch die Ver-/Umwandlung in Werkstoffe (und bei Bedarf allen voran die chemischen Elemente Stickstoff und Sauerstoff u. a. schadlos in das Gerüst der Makromoleküle einbauen zu können) gelang und gelingt es nach wie vor Einsatzgebiete zu erschließen, die bislang als Utopie galten, z. B. in der Luft- und Raumfahrt, Robotik oder im IT-Bereich, vgl. Kapitel 2.

1.2.2 Kunststoffe und die Grundbedürfnisse des Menschen

Maslowschen
Bedürfnis-
pyramide
fünf Grund-
bedürfnisse des
Menschen

Fragt man nach den Grundbedürfnissen eines Menschen, so sind diese in einem erweiterten Modell der Maslowschen Bedürfnispyramide auf den drei unteren Stufen zu finden, vgl. Bild 1.8. Vereinfacht ausgedrückt lassen sie sich in Form einer Prioritätenliste oft an einer Hand abzählen: z. B. *Nahrung, Bekleidung, Wohnung, Gesundheit und Kommunikation*. In all diesen fünf Bereichen leisten Kunststoffe einen bedeutenden Beitrag, ohne den – in unserer westlichen Zivilisation – die hohen Ansprüche des Individuums an diese Bedürfnisse nur schwerlich zu erfüllen wären. Auch gehören viele dieser Kunststoffanwendungen mittlerweile so zum Alltag, dass der Kunststoff als solcher gar nicht mehr wahrgenommen wird.

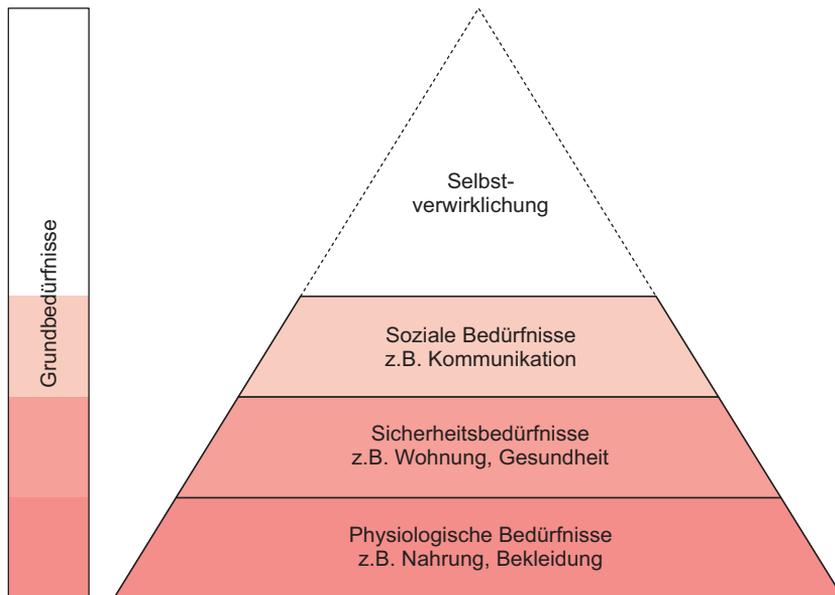


Bild 1.8: Erweitertes Modell der Maslowschen Bedürfnispyramide

1.2.2.1 Nahrung

Da Nahrungsmittel nicht unbeschränkt haltbar sind, benötigen sie einen Schutz vor vorzeitiger Verderbnis. Gerade in industriellen bzw. postindustriellen Gesellschaften ist daher die Versorgung der Bevölkerung mit dem vielfältigen Lebensmittelanangebot

ohne Kunststoffverpackungen impraktikabel (z. B. Tiefkühlkost). Unversehrtheit beim Transport, einschließlich vereinfachtes Handling, Haltbarkeit und Hygiene der Nahrungsmittel könnten durch „Kunststoff-Know-how and Know-why“ in der Verpackungstechnik deutlich verbessert werden. Überdies würde das Materialgewicht, beispielsweise beim Ersatz der Kunststoffe durch Papier, um ein Mehrfaches ansteigen – mit schwerwiegenden ökonomischen und ökologischen Konsequenzen.

Süßwasser ist eine Voraussetzung für das Überleben der Menschheit, sei es als Trinkwasser oder zur Erzeugung von Nahrung. Hier spielen Kunststoffe u. a. als Rohre zur Wasserver- und -entsorgung, als Schäume, Folien, Vliese und dergleichen zur Speicherung von Wasser in den Böden eine herausragende Rolle. Eine Anwendung mit steigender Wichtigkeit sind Kunststoffe als Filtermembranen für die Trinkwasseraufbereitung.

Wasser: Quell
des Lebens

1.2.2.2 Bekleidung

Ohne dieses Thema in langatmigen Details zu erschöpfen, sei der moderne Mensch mit all seinen Aktivitäten in Beruf, Freizeit und Sport als Wachstumsfaktor für den Bedarf von „Chemiefasern“ in Erinnerung gebracht. Modische Kleiderstoffe und Accessoires, Ski- und Jogginganzüge, daneben schusssichere Westen aus Aramid für die Polizei, Schutanzüge für die Feuerwehr, mögen beispielhaft die Millionen Tonnen von Kunststoffen zur Erzeugung von Synthefasern illustrieren. Nicht zu vergessen der Einsatz von Kunststoffen als bevorzugte Werkstoffe z. B. als Kopf- und Augenschutz (Helme und Brillen) oder im Schuhbereich (von der Sandale bis zum Stiefel).

Schutz und
Sicherheit

Aus aktuellem Anlass einer Pandemie: Schutzkleidung „von Kopf bis Fuß“ aus Kunststoffen (meist als Folien) bei der Behandlung und Prävention.

1.2.2.3 Wohnung

Ausgehend von so fundamentalen Anforderungen an das Wohnen wie Wärme-/Kälteisolation oder Nutzung der Elektrizität (Beleuchtung, Heizung, Kommunikation, Motoren usw.) sind Kunststoffe im modernen Wohnungsbau unersetzliche Werkstoffe.

Bei einer Aufwertung des Begriffs Wohnung in Wohnbereich kommen zusätzliche Anwendungen mit ins Spiel, wie z. B. Lacke und Farben auf der Basis von Kunststoffen, Möbel, Teppiche, Vorhänge und dergleichen. Nicht zuletzt sei an dieser Stelle der wertvolle Beitrag der Kunststoffe bei Altbausanierungen (z. B. Bautenschutzfolien, Nasszellen, Fensterprofile) als umweltschonende Materialien in Erinnerung gebracht. Der altgediente Slogan „Kunststoffe – Werkstoffe der Zukunft“ hat daher nach wie vor seine volle Berechtigung.

Kunststoffe als
Isolations-
materialien

1.2.2.4 Gesundheit

Wer ist sich schon bewusst, welche „Dienstleistungen“ von den Kunststoffen zur Erhaltung der Gesundheit erbracht werden? Ohne in langatmigen Aufzählungen zu verweilen, sei der Kunststoff als Mittel zum Zweck im Sportbereich ausgewählt: zu Lande (Skifahren, Surfen, Tennis, Jogging, Ballspiele, Turngeräte, Matten etc.), zu Wasser (Schnorcheln, Tauchen etc.) und in der Luft (Gleitschirm-, Segel- und Motor-Fliegen etc.).

Kunststoff als
Mittel zum
Zweck

Und ohne Kunststoffe keine moderne Medizintechnik, vgl. Abschnitt 15.4. Angefangen von den wiederverschließbaren Infusionsbeuteln, Kanülen etc. zur sicheren Versorgung der Patienten mit Medikamenten. Aus aktuellem Anlass: knickfreie Beat-

ohne
Kunststoffe
keine moderne
Medizintechnik

mungsschläuche, die lebensrettenden Sauerstoff in die Lunge von Erkrankten leiten oder körperverträgliche Sonden aller Art. Selbst ambulante Eingriffe sind ohne «Kunststoffhelfer» undenkbar.

Außerdem lassen sich mit biologisch abbaubarem Nahtmaterial und Knochennägeln auf der Basis von Polymilchsäure – Polylactid – die Risiken und Kosten einer Nachoperation vermeiden. Dabei ist der strukturelle Aufbau der Polylactide so gewählt, dass die Resorption nicht schlagartig sondern innerhalb eines wählbaren Zeitraums stattfindet. Auf diese Weise kann z. B. ein Abbau beim Nahtmaterial in Relation zur fortschreitenden Wundheilung erfolgen, d. h. Fadenreißkraft und Wundheilung stehen bei dieser Technik umgekehrt proportional zueinander. Ebenfalls Stand der Technik sind die Arzneimittel-Abgabe-Systeme (Drug-Delivery-Systems), bei denen der Wirkstoff über einen definierten Zeitraum hinweg – an einen festgelegten Ort im Körper – in einer im voraus bestimmten Rate abgegeben wird. Bei dieser eleganten Form der Arzneimittelabgabe, die zur Langzeitbehandlung von Patienten dient, übernehmen Polymere die Aufgabe, als Verzögerungssystem zu wirken, z. B. in Form einer Matrix als Hemmsubstanz mit dispergiertem Wirkstoff.

Implantate	Weitere Beispiele sind Implantate im Hüft- und Kniebereich aus Polyetheretherketon (PEEK) bzw. ultrahochmolekularem Polyethylen (UHMWPE). Außerdem ergeben sich Anwendungen für Kunststoffe im Bereich der Orthesen, Prothesen oder bei Inlays, z. B. für Hörgeräte, wo auch Materialien wie Polyurethane (PUR), Silicone u. a. zum Einsatz kommen. Großes Wachstumspotenzial besitzen nach wie vor Verfahren wie die Additive Fertigung bzw. der 3D-Druck, mit denen sich bereits heute Ersatzteile für den Bedarf eines einzelnen Patienten herstellen lassen, vgl. Abschnitt 3.5.11.
Hörgeräte	
Operationsnachsorge	Ein breites Einsatzgebiet findet sich zudem bei der Operationsnachsorge und Pflege. So leisten beispielsweise sauerstoff- und dampfdurchlässige Folienverbände aus PUR unverzichtbare Dienste im Bereich der Wundversorgung. Stellvertretend für ganze Bauteile aus Kunststoff sei abschließend eine künstliche Niere erwähnt, die dank ihrer semipermeablen Membran aus ultradünnen Kunststoffhohlfasern eine Blutwäsche ermöglicht und von deren Einsatz allein in Deutschland das Überleben von rund 100'000 Menschen abhängt (Stand 2020).
künstliche Niere	

Aus aktuellem Anlass einer Pandemie: Bruch sichere Schutzwände aus transparenten Kunststoffen zwischen Personal und Kundschaft.

1.2.2.5 Soziale Bedürfnisse

schnelle Kommunikation und Information	Was auch immer unter diesem Oberbegriff zu nennen ist, ohne Kommunikation geht (fast) nichts. Insbesondere schnelle Kommunikation und Information über Wort und Schrift sind zu unerlässlichen Voraussetzungen geworden, um die Lebensqualität des Einzelnen zu gewährleisten. Die heute fast beliebige Verfügbarkeit Informationen zu speichern ist zugleich das Ergebnis einer stürmischen Kunststoffentwicklung, die mit der Vinylplatte aus PVC begann, abgelöst durch das Ton-/ Videoband beschichtetes Polyesterband), gefolgt von CD/DVD (vor allem aus Polycarbonat, PC) bis hin zum Prozessor, dem Herzstück des Computers, auch als CPU (Central Processing Unit) bezeichnet, vgl. Abschnitt 15.2.4. Parallel dazu bewiesen Kunststoffe ihre Überlegenheit als isolierende und Kosten sparende Gehäusewerkstoffe für Kommunikationsmittel aller Art (u. a. Telefon, Smartphone, Computer). Und was den vorläufig noch wichtigsten Informationsträger anbelangt: ohne Kunststoffe vielfach keine glatten und damit bedruckbaren Papieroberflächen in riesigen Mengen und zugleich preisgünstiger Form.
Telefon, Smartphone, Computer	

1.3 Geschichte der Kunststoffe

Zu den Vorläufern unserer heutigen Kunststoffe zählen Naturstoffe wie Bernstein, Kopalharz, Schildplatt oder Horn, die seit Menschengedenken den Status von Werkstoffen einnehmen. Ihr kunststoff-ähnliches Verhalten resultiert aus ihrer Struktur, die sie als natürliche Polymere ausweist, vgl. dazu Abschnitt 2.1 und 3.1. Überdies lassen sich selbst für abgewandelte Naturstoffe bereits Belege für ihre Verwendung als „Kunststoff“ finden. An Hand von archäologischen Funden lässt sich belegen, dass bereits vor mehr als 200'000 Jahren ein von Menschenhand erzeugtes *Birkenpech* als *Klebstoff* diente. Als Rohstoff diente Birkenrinde, für deren Umwandlung in ein Pech bereits die Neandertaler (vermutlich!) verschiedene Varianten kannten. Nebenbei bemerkt bestand die im Mittelalter übliche Methode in einem Verschmelzungsprozess, chemisch bekannt als trockene Destillation bei Temperaturen zwischen 360 und 400 °C. Anwendung als Klebstoff fand es beispielsweise bei den Neandertalern zur Befestigung ihrer aus Stein (u. a. Feuerstein) und Holz gefertigten Werkzeuge und Waffen (Messer, Speere etc.). Klebeverbindungen samt Herstellung der dazu benötigten Klebstoffe gehören damit zu den ältesten handwerklichen Techniken in der Geschichte der Menschheit.

Birkenpech
als Klebstoff

trockene
Destillation

Supplementär: Animationen zu Birkenpech.

Einen geradezu rituellen Status erlangten einige Harze und ihre Abkömmlinge im alten Ägypten. Bei der Mumifizierung ihrer Toten verwendeten sie zur mehrfachen Umhüllung der Leichname zunächst in Streifen geschnittenes Material, z. B. ausgediente Textilien. Die so entstanden Bandagen wurden mit Harz zusammengeklebt. Zum Einsatz kamen dabei auch kostbare Harze wie etwa das „styrolhaltige“ Storaxharz; vgl. Kapitel 6. Bei einer genaueren Betrachtungsweise der damaligen Wickeltechnik ergeben sich frappante Ähnlichkeiten zu den noch heute gepflegten handwerklichen Laminierverfahren.

Laminier-
verfahren

Verfolgt man die Geschichte der Kunststoffe und ihrer Herstellung bis auf urkundlich belegte Quellen zurück, so reduziert sich der Zeitraum, den die Forschung auf diesem Gebiet vorläufig erfasst, drastisch. Es tritt eine Zeitspanne zutage, die rund ein halbes Jahrtausend zurückreicht, jedoch immer noch viel größer ist als gemeinhin angenommen wird. Bereits um 1530 wurde im Augsburger Hause der Fugger das erste überlieferte Rezept zur Herstellung eines Kunststoffs niedergeschrieben. Besitzer dieses Rezeptes war Bartholomäus Schobinger, Bürger von St. Gallen (Schweiz), von dem es der bayerische Benediktinerpater Wolfgang Seidel (1492–1562) persönlich übernahm und in seinen Tagebüchern festhielt, vgl. Bild 1.9.



Bild 1.9: Bartholomäus Schobinger (1500–1585)

Besitzer des ersten überlieferten Rezeptes zu Herstellung eines Kunststoffs
Münze, Historisches Museum St. Gallen

Als Rohstoff diente Ziegenkäse, der zu diesem Zweck eine längere Kochprozedur erfährt, um schließlich als durchsichtig formbares Harz vorzuliegen. In die heutige Sprache übertragen, lautet das Rezept wie folgt:

„Nimm einen Ziegen- oder sonst einen mageren Käse, zerschneide ihn dann in Stücke, gebe diese in einen Kessel, tue Wasser dazu und lasse ihn einen Tag lang schön sieden, dass er zersiede, tue ihn hernach vom Feuer, lasse ihn abkühlen, bis sich die dicke Materie setzt, dann gieße das Weiße, das wie eine Milch ist, das auch oben schwimmt, darvon. Das aber am Boden bleibt, das lasse liegen, gieße wieder heißes Wasser dazu, lasse es ein wenig aufsieden, rühre es dabei wohl um, damit sich das Weiße davon scheidet. Tue dies so oft, bis nichts Weißes mehr abgeht, so bleibt unten am Boden eine Materie, zäh wie ein Horn, ist wie ein „Rangulum“ oder Tropfen. Nachdemselbigen (Anm.: Gemeint ist nach diesen Arbeiten.) nimm eine warme Lauge, die gut warm sein muss. Dahinein wirfst du die gereinigte Materie und drückst sie warm aus der Lauge in eine Form. Sobald dies geschehen ist, wirfst du die Form mitsamt der Materie in kaltes Wasser, so wird sie hart wie Bein und fein durchsichtig.

Doch musst du wissen, wenn du diese Materie formen willst und nach deinem Gefallen machen, so musst du dieses tun, solange sie warm ist, so lässt sie sich drücken und biegen wie ein Leim, auch dann, wenn sie schon vorgeformt ist..., sobald die aber kalt ist, so muss man es lassen wie es ist, es lässt sich nicht biegen oder falten, es bricht wie ein Glas...“

Quelle: Georg Schnitzlein – Deutsches Museum, München

Auch in den nachfolgenden Jahrhunderten finden sich immer wieder Ansätze, vorhandene Naturstoffe in Kunststoffe zu verwandeln. Ein großer Durchbruch wurde Mitte des vorletzten Jahrhunderts (um 1850) erzielt, als es erstmals gelang, Kautschuk und Cellulose chemisch so zu verändern, dass sich die entstandenen Umwandlungsprodukte durch völlig neue Eigenschaften auszeichneten (Gummi, Vulkanfiber, Celluloid). Die Chemie der abgewandelten Naturstoffe erlebte in den darauf folgenden sechs bis sieben Jahrzehnten einen gewaltigen Aufschwung (bis ca. 1930) und feierte mit Produkten wie Kunsthorn aus Kasein (auf der Basis von Milcheiweiß), dem Zellglas und den Cellulosederivaten (Celluloseacetat, -butyrat usw.) großartige Triumphe. Parallel einher ging dazu die Entwicklung geeigneter Verarbeitungstechnologien und Verarbeitungsmaschinen für diese neuartigen Materialien. Rückblickend ist diese Epoche als die technologische Wurzel der heutigen Kunststofftechnik zu bezeichnen.

Ebenfalls zur gleichen Zeit begann mit der berühmten Harnstoffsynthese von Friedrich Wöhler (1828) der Siegeszug der organischen Chemie, die als neuer Zweig der chemischen Forschung eine Fülle neuartiger Stoffe und Verbindungen auf der Basis von Kohlenstoff hervorbrachte. Darunter befanden sich auch zähflüssige bis feste Verbindungen, die durch Einwirken von Licht und/oder Wärme aus einfachen gasförmigen oder flüssigen Substanzen entstanden. Ihre wissenschaftliche Erforschung erfolgte allerdings erst Anfang des letzten Jahrhunderts. Doch bereits den ersten Vertretern dieser Synthese-Werkstoffe, die es bis zur technischen Reife brachten, war ein großer Erfolg beschieden und sie gelangten als Materialien in Industriezweigen wie Elektro- und Flugzeugindustrie zu großem Ansehen. Als die vier Asse aus dieser Zeit sind hier namentlich zu erwähnen: Phenolharz (PF), Acrylglas (PMMA), Polyvinylchlorid (PVC) und Polystyrol (PS). Der wissenschaftliche Durchbruch bleibt dabei mit dem Namen des deutschen Chemikers Hermann

Staudinger (Nobelpreis 1953) verbunden, der in seinen bahnbrechenden Arbeiten um 1920 (ETH Zürich) zeigte, dass viele Naturstoffe und alle Kunststoffe aus Makromolekülen bestehen.

Zitat:

„Da es sich bei diesen Hochpolymeren um typisch organische Verbindungen handelt, so müssen diese homöopolar gebauten Stoffe Moleküle bilden; nur sind diese im Vergleich mit den einfachen Verbindungen sehr groß, so daß für sie der Name Makromoleküle vorgeschlagen wurde.

Die Welt der organischen Verbindungen liegt gewissermaßen zwischen den einfachen Kohlenstoffverbindungen, dem Methan, den Kohlenoxyden, dem Cyan und den allergrößten Molekülen, dem hochpolymeren Kohlenstoff.

Trotz der großen Zahl von organischen Körpern, die wir heute schon kennen, stehen wir so erst am Anfang der Chemie der eigentlichen organischen Verbindungen und haben nicht etwa einen Abschluß erreicht.“

Hermann Staudinger, Ber. Dtsch. Chem. Ges. 59.301 (1926)

Beflügelt durch die Visionen Staudingers verstärkten viele Hochschul- und Industrielaboratorien ihre Forschungsanstrengungen auf dem Gebiet der Kunststoffchemie. In der Folge gelang es, die chemischen Reaktionen, die zum Aufbau von Kunststoffen führen, immer besser zu verstehen und vor allem neue Synthesen zu finden.

Das Ergebnis waren Kunststoffe verschiedenster Art, die je nach eingesetztem Ausgangsmaterial, Zusatzstoffen und entsprechender Prozessführung Produkte mit ganz bestimmten Eigenschaften ergaben, die gleichzeitig für unterschiedlichste Zwecke brauchbar waren. Für die Jahre zwischen 1930 und 1950 sind als herausragende Entwicklungen viele so genannte technische Kunststoffe zu nennen, wie die Polyamide, die Polyester, das Polyethylen oder die fluorhaltigen Polymere, die Polyurethane und die Epoxidharze. Gleichzeitig wurde in der chemischen Industrie die verfahrenstechnische Basis gelegt, um großtechnisch Kunststoffe als Werkstoffe herstellen zu können.

Ein weiterer wissenschaftlicher Groß Erfolg gelang den beiden Forschern Giulio Natta und Karl Ziegler im Jahre 1952 durch die Verwendung neuartiger Katalysatoren bei der Herstellung von Polyolefinen. Der bis dahin nur bei hohem Druck und hohen Temperaturen mögliche Polymerisationsprozess konnte auf diese Weise auch bei normalem Druck und niedrigen Temperaturen durchgeführt werden. Gleichzeitig gelang es auf diese Art, Makromoleküle mit einem hohen räumlichen Ordnungsgrad zu synthetisieren. Diese Erkenntnis, mit Hilfe so genannter stereospezifischer Katalysatoren das Gefüge (Morphologie) eines Kunststoffs und damit seine Eigenschaften zu beeinflussen, hat bis in die jüngste Zeit zu neuen großartigen Produktentwicklungen geführt. Als Stichwort sei hier die neue Klasse von Katalysatoren erwähnt, die so genannten Metallocene.

Der Streifzug durch die Geschichte der Kunststoffe wäre unvollständig, ohne gleichzeitig an die herausragenden Leistungen zu erinnern, die neben der Chemie – speziell im Maschinenbau und im Bereich der Physik/Materialwissenschaften – weltweit erbracht wurden. Jede zukünftige Entwicklung wird daher immer nur insofern erfolgreich sein können als es gelingt, diese Wechselbeziehung im Sinne einer interdisziplinären Zusammenarbeit zu pflegen und zu respektieren, vgl. Bild 1.10.

Giulio Natta
Karl Ziegler
Nobelpreis
1963

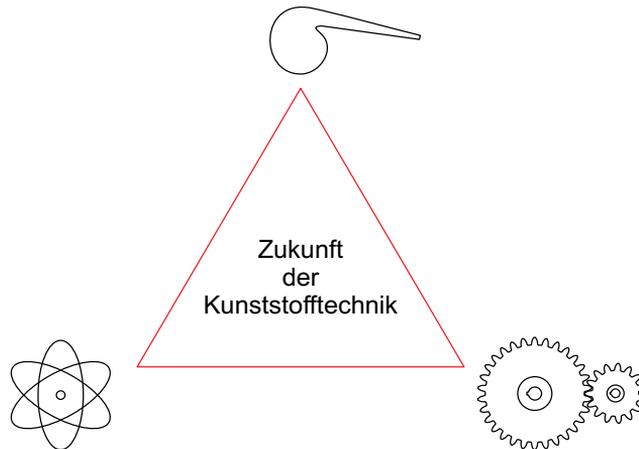


Bild 1.10: Die Zukunft der Kunststofftechnik im Spannungsfeld der Wechselbeziehungen zwischen Chemie, Physik und Ingenieurwissenschaften

1.3.1 Kurzer Abriss der Entwicklung der Polymerwissenschaften (ohne Copolymere und Blends)

Quelle: P. Smith und Natalie Stutzmann, ETH Zürich

Kunststoff aus Kasein 1530

Bartholomäus Schobinger (1500–1585)

Der St. Galler Bartholomäus Schobinger verrät Wolfgang Seidel, Mönch in Tegernsee und Andechs, eine geheime Rezeptur:

„Wenn man den Anweisungen folge leiste, kann man daraus Tischplatten, Trinkgeschirr und Medaillons gießen – also alles, was man will.“

Erste überlieferte Rezeptur für einen Kunststoff

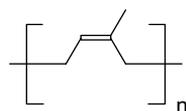
Vulkanisation von Kautschuk 1839

Charles Goodyear (1800–1860)

Die Verwendung von Naturkautschuk, der aus dem Milchsaft bestimmter Pflanzenarten gewonnen werden kann, ist bereits in Abbildungen mexikanischer Indianer aus dem 10. Jahrhundert dargestellt.

Charles Goodyears Vulkanisation (= weitmaschige Vernetzung der Polymerketten) mit Schwefel macht den Kautschuk elastisch und haltbar, und dadurch erst technisch einsetzbar.

U.S. Patent 3633



(1.1)

Kautschuk: caa ocho (indianisch): tränender Baum

Celluloid 1870**John W. Hyatt (1837–1920)**

J. W. Hyatt entwickelt den ersten kommerziell erfolgreichen Kunststoff auf Grund Parkes' leicht entflammbarer Nitrocellulose-Campher-Mischung (Celluloid).

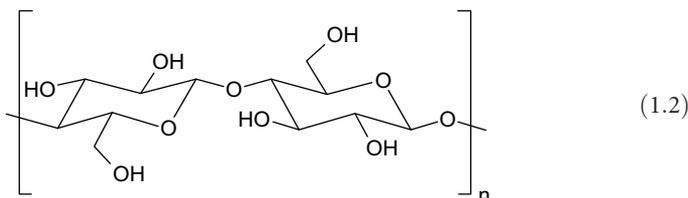
U.S. Patent 105338

Anwendungen: Photographische Filme (eingeführt von George Eastman 1884), Tischtennisbälle, Käämme

**Viskose 1892****Charles Cross (1855–1935)****Edward Bevan (1856–1921)****Clayton Beadle (1868–1917)****Hilaire Bernigaud, Comte de Chardonnet (1839–1924)**

C. Cross, E. Bevan und C. Beadle entwickeln, basierend auf Chardonnet's Methode zur Regenerierung von Cellulose (1884), einen Prozess zur Herstellung von Viskose. Durch eine chemische Reaktion werden die Polymermoleküle vorübergehend modifiziert, damit die Cellulose verarbeitbar wird.

U.S. Patent 520770



Anwendungen: Cellophan[®]-Filme, Rayon[®]-Fasern (rayonner (franz.): glänzen)

**Protein-Struktur 1906****Emil H. Fischer (1852–1919)**

Um 1900 sind 16 von den 20 Aminosäuren, welche als Grundbausteine der Proteine gelten, bekannt.

E. H. Fischer beschreibt das Formen von chemischen Verbindungen in Proteinen mit einem korrekten Mechanismus (Peptid-Verbindungen zwischen benachbarten Aminosäuren).

1906 prägt E. H. Fischer den Ausdruck „Polypeptid“.

Ber. Chem. Ges. 39, 530 (1906)

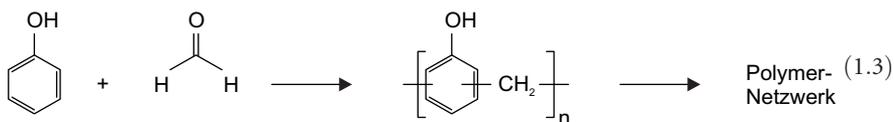
**Bakelit (Phenol-Formaldehyd-Harz) 1907****Leo H. Baekeland (1863–1944)**

L. H. Baekeland meldet 1907 grundlegende Patente zur Herstellung von Phenol-Formaldehyd-Harzen (PF) an.

Die von ihm gegründete Bakelitgesellschaft startet erste technische Produktion von PF-Harzen, den ältesten vollsynthetischen Kunststoffen, 1910.

U.S. Patent 942699





Anwendung: Isolatoren, Stecker, Schalter, Billardkugeln, Radiogeräte

Struktur von Gummi 1910

Samuel S. Pickles (1878–1962)

S. S. Pickles schlägt für Gummi eine (zyklische) Kettenstruktur vor.

J. Chem. Soc. 97, 1085 (1910)

Er erhält 1939 die Colwyn-Goldmedaille für seine wertvollen Beiträge für die Gummi-Industrie.



Polyvinylchlorid (PVC) 1912

Friedrich Klatté (1880–1934)

F. Klatté, Griesheim-Elektron, lässt die Polymerisation und industrielle Produktion von Polyvinylchlorid (PVC) patentieren.

Heute stellen PVC und die anderen chlorierten Polymere die zweitgrößte Kunststoffgruppe dar.



Dt. Patent 28877

Anwendungen: Grammophonplatten, Flaschen, Regenmäntel, Spielzeuge, Schläuche, ...

Makromoleküle 1920

Hermann Staudinger (1881–1965)

Vor der Schweizerischen Chemischen Gesellschaft stellt H. Staudinger, ETH-Zürich, 1917 zum ersten Mal seine Spekulation vor, dass „hochmolekulare Verbindungen“ aus kovalent-gebundenen, langkettigen Molekülen bestehen.

1920 begründet H. Staudinger mit seinem Artikel „Über Polymerisation“ die modernen Polymerwissenschaften.

Ber. Chem. Ges. 53, 1073 (1920)

Der Term „Makromolekül“ wird 1922 von ihm eingeführt.

H. Staudinger erhält 1953 den Nobelpreis für Chemie.



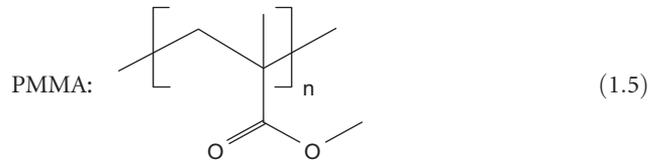
Acrylkunststoff 1927

Otto Röhm (1876–1939)

Durch die Polymerisation von Methylmethacrylat stellt O. Röhm das erste Stück „organisches Glas“ her.



Die industrielle Produktion von Polymethylmethacrylat (PMMA) beginnt 1935 bei Röhm & Haas unter dem Markennamen Plexiglas[®], bekannt heutzutage auch als Perspex[®], Diakon[®], Lucit[®] und O-roglass[®], ...



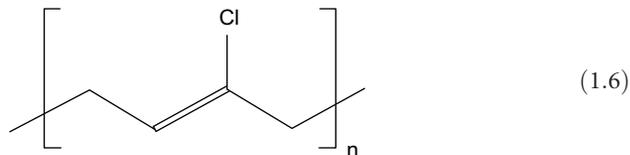
Anwendungen: Flugzeugverglasungen, Rückstrahler, Verkehrsschilder, Duschkabinen, ...

Synthetischer Gummi 1931

Julius Nieuwland (1878–1936)

J. Nieuwland behandelt Divinylacetylen mit Chlorschwefel, wobei „eine elastische Substanz, die stark Naturkautschuk gleicht“, entsteht. Eine Kollaboration mit DuPont führt 1931 schlussendlich zum ersten kommerziell erfolgreichen, vollständig neuen, synthetischen Gummi.

DuPont startet industrielle Produktion von Neopren[®] 1933.



U.S. Patent 1811959

N.B.: Schon 1930 erhalten die I.G. Farben ein Patent für die Emulsions-Polymerisation von Dienen mit Natrium, Buna-Gummi, der jedoch nie auf industrieller Basis produziert wird.

Dt. Patent 511145

Anwendungen: Isolationen für z. B. elektrische Kabel, Surfer- und Taucheranzüge.

Polyethylen 1933

Eric W. Fawcett

Reginald O. Gibson

E. W. Fawcett und R. O. Gibson, Imperial Chemical Industries (ICI), erhalten beim Versuch, Ethylen und Benzaldehyd unter hohem Druck reagieren zu lassen, durch Zufall verzweigtes Polyethylen.

Erste industrielle Kleinserienproduktion startet 1939.



Brit. Patent 471590

Anwendungen: Isolationen für Radarsets, elektrische Isolationen, Verpackungsmaterial, ...





Polymer-Theorie 1934

Werner Kuhn (1899–1963)

W. Kuhn entwickelt das erste statistisch-mechanische Modell für die Viskosität von Polymerlösungen, sowie das Konzept des „ausgeschlossenen Volumens“.

Kolloid Z. 68, 2 (1934)

Im Jahre 1936 führt er ein Modell für die Gummi-Elastizität ein.

Kolloid Z. 76, 258 (1936)



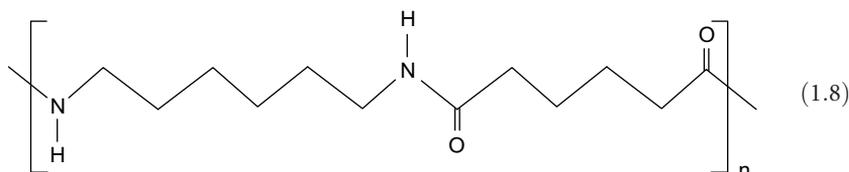
Nylon 1935

Wallace H. Carothers (1896–1937)

Die Pionierarbeit über die Synthese von Polyamiden von W. H. Carothers, DuPont, führt zur Herstellung der ersten vollsynthetischen Polymerfasern.

DuPont startet 1939 kommerzielle Produktion unter dem Markennamen Nylon 6.6.

Weitere Polyamide mit unterschiedlichem chemischen Aufbau sind bekannt als Perlon[®], Rilsan[®], Grilamid[®], Vestamid[®], Stanyl[®].



U.S. Patente 2130947; 2130948

Anwendungen: Fasern, Zahnräder, Heizöltanks, Sportartikel wie Skischuhe, Roller-skates, ...

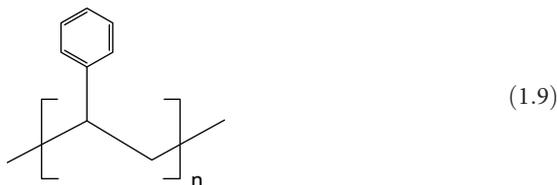


Polystyrol 1936

Hermann F. Mark (1895–1994)

H. F. Mark entwickelt zusammen mit C. Wulff, I.G. Farben, einen kommerziell erfolgreichen Prozess für die katalytische Produktion von Polystyrol (Styron[®], Hostyren[®]).

Polystyrolschaumstoffe (Styropor[®]) werden zum ersten Mal 1951 technisch hergestellt.

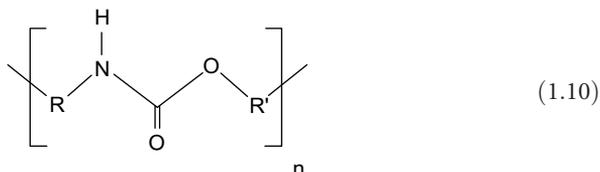


Anwendungen: Transparente Dosen, CD-Hüllen, Einwegbestecke, Verpackungsmaterial, ...

N.B.: Styrol wurde vorher schon mehrere Male, z. B. von E. Simon 1839 sowie von A. W. Hofmann und J. Blyth 1845, polymerisiert, aber ohne den Nutzen des erhaltenen Produkts zu erkennen.

Polyurethane 1937**Otto Bayer**

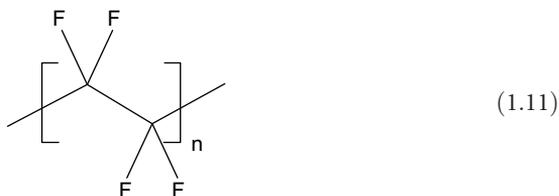
O. Bayer formuliert das Grundpatent für die Herstellung der vielseitigen Polyurethane. Polyurethane werden 1940 von der Bayer AG im technischen Maßstab hergestellt.



Anwendungen: Schuhsohlen, Isolationen für z. B. Gebäude und Kühlschränke, Matratzen, Stoßfänger und Spoiler für Automobilbau, Kleber, ...

**Teflon 1938****Roy J. Plunkett (1910–1994)**

R. J. Plunkett und J. Rebock, DuPont, finden bei der Untersuchung von Kühlmitteln ungewollterweise Poly(tetrafluorethylen) (PTFE), den „schlüpfrigsten“ und chemisch am meisten inerten Feststoff der Welt.



U.S. Patent 2230654

Anwendungen: Dichtungen, Anti-Korrosions-Schutzschichten, künstliche Blutgefäße, „atmende“ Textilien (Gore-Tex[®]), Pfannen, ...

**Silicone 1940****Eugene G. Rochow (1909)**

E. G. Rochow und Mitarbeiter, General Electric, entdecken ein industrielles Syntheseverfahren für Polysiloxane (Silicone). 1942, Müller-Rochow-Synthese auf der Basis von hochreinem Silicium.

Industrielle Großanfertigung beginnt 1947.

Spuren auf dem Mond:

Die Sohlen der „Moonboots“ bestanden aus Silicon.



U.S. Patent 1158218

Anwendungen: Isolationsmaterial, hochtemperaturbeständige Öle, Dichtungen, ...





Polyester 1941

J. R. (Rex) Whinfield

James T. Dickson

J. R. Whinfield und J. T. Dickson, Calico Printers Association, entwickeln Textilfasern aus Polyethylenterephthalat (PET).

Kommerzielle Produktion durch ICI beginnt 1953.



Einführung der ersten PET-Flaschen durch Pepsi-Cola[®] 1975.

Anwendungen: Textilfasern, Filme, Magnetbänder, Flaschen, ...

Bekannte Handelsnamen für PET-Fasern und -Filme sind: Terylen[®], Dacron[®], Trevira[®], Melinex[®], Mylar[®].

Acrylfasern (PAN) 1941

Herbert Rein

H. Rein, I.G. Farben, produziert aus Polyacrylnitril (PAN) unter Verwendung des dazumal neuen Lösemittels Dimethylformamid (DMF) Fasern (Dralon[®], Orlon[®], Dolan[®]).

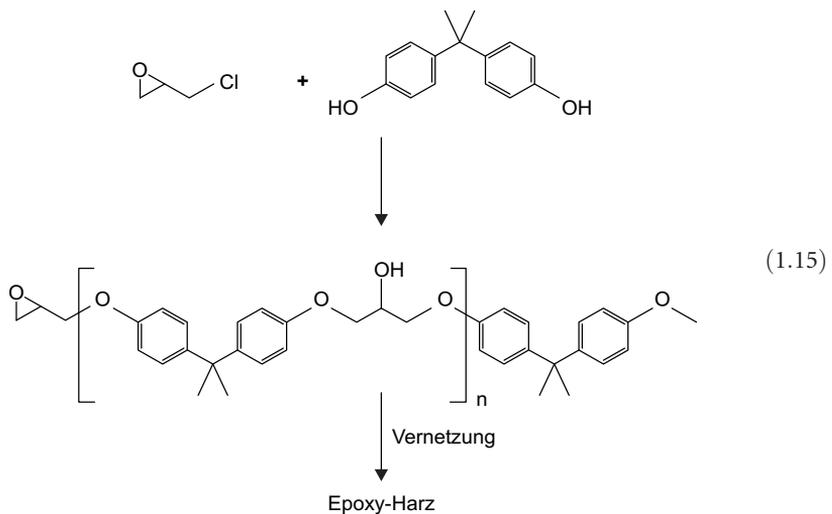


Anwendungen: Hauptsächlich Textilfasern.

Epoxy 1943

P. Castan

Paul Schlack beschreibt 1934 Herstellung und Aufbau von aromatischen Epoxidharzen.



P. Castan, Gebr. De Frey, findet 1943 die für die technische Verwendung entscheidende Härtingsreaktion dieser Harze.

Im Jahr 1946 stellt CIBA die ersten Epoxid-Gieß- und -Lackharze sowie Klebstoffe auf Basis des aromatischen Bisphenol-A-Epoxidharzes her.

Anwendungen: Klebstoffe (Araldit[®]), Verbundwerkstoffe für Sportartikel, Flugzeuge und Raumfahrt.

Polyoxymethylen (POM) 1947

DuPont startet 1947 ein Forschungsprogramm, welches zu dem Strukturwerkstoff Polyformaldehyd führt.

Polyoxymethylen (POM) wird erstmals 1959 in technischem Maßstab hergestellt und unter dem Namen Delrin[®] vermarktet.



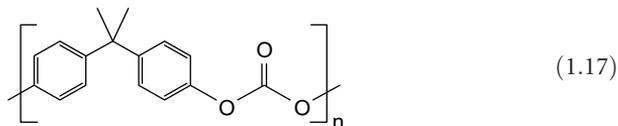
Anwendungen: Gasfeuerzeuge, Zahnräder und Lager für z. B. Uhrwerke, Handprothesen, Reißverschlüsse, ...

Polycarbonat (PC) 1953

Hermann Schnell

H. Schnell, Bayer AG, entwickelt und patentiert die Polycarbonate (PC), welche seit 1958 unter dem Handelsnamen Makrolon[®] kommerziell produziert werden.

Polycarbonate sind heutzutage ebenfalls bekannt als Lexan[®] und Merlon[®].



Anwendungen: Zerstörungssichere Scheiben für z. B. Telefonkabinen, Helmvisiere, Schutzbrillen, Füllfederhalter, Slalomstangen, Einwegspritzen, Babyflaschen, Compact-Disks, ...

DNA-Struktur 1953

James D. Watson (1928)

Francis H. C. Crick (1916)

J. D. Watson und F. H. C. Crick schlagen für die DNA eine Doppelhelix-Struktur vor. Die Ära moderner Zellbiologie beginnt.

Nature 171, 737 (1953)

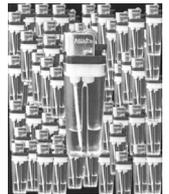
J. D. Watson und F. H. C. Crick erhalten 1962 den Nobelpreis für Medizin

Polymer-Theorie 1953

Paul J. Flory (1919–1985)

P. J. Flory erklärt die Kinetik von Radikal-Polymerisationen mittels Ketten-Transfer-Mechanismus im Jahre 1937.

J. Am. Chem. Soc. 59, 241 (1937)



Im Jahre 1941 formuliert er eine Theorie für polymere Netzwerke, Gelformierung und Wichtigkeit des Gelpunkts.

J. Am. Chem. Soc. 63, 3083 (1941)

Unabhängig von einander entwickeln M. L. Huggins und P. J. Flory eine neue Theorie für Polymerlösungen.

J. Chem. Phys. 10, 51 (1942)

J. Am. Chem. Soc. 64, 1712 (1942)

Flory's Buch „Principles of Polymer Chemistry“, ein Meilenstein der Polymerwissenschaften, wird 1953 publiziert.

Eine Theorie mit fundamentaler Bedeutung für flüssigkristalline Polymere formuliert er 1956.

Proc. Roy. Soc. (London), A 234, 73 (1956)

P. J. Flory erhält den Nobelpreis für Chemie 1974.

Lineare Polyolefine (PE / i-PP) 1953/55



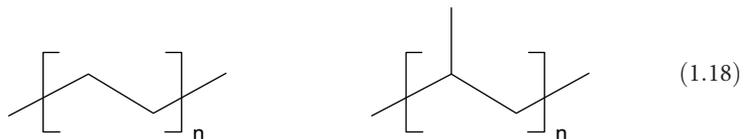
Karl Ziegler (1898–1973)

Giulio Natta (1903–1979)

K. Ziegler synthetisiert 1953 lineares Polyethylen (PE) bei tieferen Temperaturen und Drücken als beim ICI-Verfahren durch Verwendung von spezifischen metallischen Katalysatoren. Produktion von linearem PE beginnt bei Hoechst 1954.

G. Natta und P. Chira berichten 1955 über ähnliche Katalysatoren zur Herstellung von kristallinem, isotaktischem Polypropylen (i-PP). Die italienische Firma Montecatini startet 1957 die Produktion von i-PP.

K. Ziegler und G. Natta erhalten 1963 den Nobelpreis für Chemie.



Dt. Patent 973626 (PE)

J. Am. Chem. Soc. 77, 1708 (1955) (i-PP)

Anwendungen: Überall!!!

Hochfeste Polymerfasern 1965

Stephanie L. Kwolek

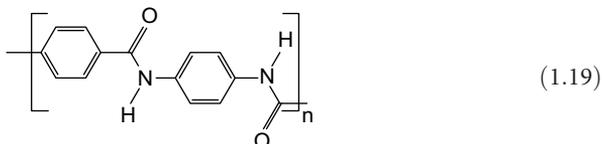
Herbert Blades



S. L. Kwolek, DuPont, synthetisiert 1965 Poly-p-phenylenterephthalamid, ein neues aromatisches Polyamid (Aramid), mit dem Ziel, ein hochtemperaturstabiles Polymer herzustellen. Zu ihrer Überraschung formt dieses in konzentrierter Schwefelsäure-Lösung, auf Grund des steifen molekularen Aufbaus, die von P. J. Flory schon 1956 vorgeschlagene flüssig-kristalline Phase.

H. Blades, DuPont, verarbeitet diese Lösungen in einem speziellen Spinnverfahren, durch welches die steifen Polymerketten orientiert werden, zu Fasern mit außeror-

dentlichen mechanischen Eigenschaften. Eine neue Ära von Hochleistungs-Polymeren und Verbundwerkstoffen beginnt.



U.S. Patent 3600350 (Synthese)

U.S. Patent 3767756 (Spinnverfahren)

Anwendungen: Hochfeste Fasern (para-Form Kevlar[®]), feuerresistente Fasern (meta-Form Nomex[®])

Polymer-Theorie 1971

Pierre-Gilles de Gennes (1932)

P.-G. de Gennes leitet 1971 das so genannte „Reptation-Modell“ für die Beschreibung der schlangenähnlichen Diffusionsbewegung polymerer Kettenmoleküle in der Schmelze her.

J. Chem. Phys. 55, 55 (1971)

Er publiziert 1979 das für die Polymerwissenschaften bedeutende Werk „Scaling Laws in Polymers“, in welchem er Theorien für das Verhalten von Polymermolekülen über, unter anderem, weite Temperatur- und Konzentrationsbereiche, entwickelt.

P.-G. de Gennes erhält den Nobelpreis für Physik 1991.



Elektrisch leitfähige Polymere 1974

Hideki Shirakawa

Alan G. McDiarmid

Alan J. Heeger

H. Shirakawa fügt bei der Polymerisation von Acetylen irrtümlicherweise einen Überschuss (1000-fach!!) an Katalysator zu und erhält in seinem Reaktor einen kohärenten, metallartigen Polyacetylenfilm.

A. G. McDiarmid, A. J. Heeger und Mitarbeiter dotieren den erhaltenen Film mit Iod, wodurch das Polymer 1000 000-fach elektrisch leitfähiger wird.

Hideki Shirakawa, Alan G. McDiarmid und Alan J. Heeger erhalten 2000 den Nobelpreis.

J. Polym. Sci. Polym. Chem. Ed. 12, 11(1974) Synthese

J. Chem. Soc. Chem. Commun. 578 (1977) Dotierung

Anwendungen: Antistatische Materialien, Transistoren, Elektroden, flexible elektronische Komponente, elektro-chemische Fenster, Wegwerfelektronik



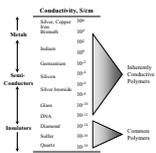


Tabelle 1.1 Elektrische Leitfähigkeiten für anorganische und organische Stoffe (Beispiele)

		Leitfähigkeit in S/cm		
Metalle	Silber, Kupfer, Eisen	10 ⁶	} Eigenständige leitfähige Polymere	
	Bismut	10 ⁴		
Halbmetalle		10 ²		
	Indium	10 ⁰		
	Germanium	10 ⁻²		
	Silizium	10 ⁻⁴		
	Brom-Silber	10 ⁻⁶		
Isolatoren		10 ⁻⁸		
	Glas	10 ⁻¹⁰		} Gemeinsame Polymere
	DNA	10 ⁻¹²		
	Diamant	10 ⁻¹⁴		
	Schwefel	10 ⁻¹⁶		
Quarz	10 ⁻¹⁸			

Ultrahochfeste Fasern (UHMW-PE) 1979

Paul Smith (1951)

Piet J. Lemstra (1947)

P. Smith und P. J. Lemstra, DSM, entwickeln ein neues technologisches Verfahren, „Gel-Spinning“, zur Produktion von ultrahochfesten Fasern aus ultrahochmolekularem Polyethylen, welche zum ersten Mal 1974 von A. J. Pennings durch Kristallwachstums-Methoden hergestellt worden sind.

Diese Fasern sind 50 % fester als Kevlar[®] und bis zu 20mal stärker auf das Gewicht bezogen als Stahl!

Kommerzialisiert unter Lizenz durch Allied Signal (Spectra[®]) 1983, und DSM/Toyobo (Dyneema[®]) 1986.



U.S. Patent 4344908

Anwendungen: Schusssichere Westen und Helme, haisichere Fischernetze und Hochleistungsangelschnüre, schneidesichere Chirurgiehandschuhe, Schutzkleidung, das „Papstmobil“, ...

Licht-emittierende Polymere 1990

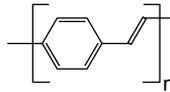
Richard H. Friend

Andrew B. Holmes

R. H. Friend, A. B. Holmes und Mitarbeiter stellen die ersten polymeren Leuchtdioden basierend auf Poly-p-phenylenvinylen her; eine Erweiterung zu den elektronischen



Komponenten von Tang und Van Slyke, Eastman Kodak, aus niedrig-molekularen organischen Verbindungen (U.S. Patent 4885211).



(1.22)

Nature 347, 539 (1990)

U.S. Patent 5247190

Potentielle Anwendungen: Flexible Lichtquellen, Flachbildschirme und -Anzeigen

1.4 Zukunft der Kunststoffe – Prognosen

Wer sich die Erforschung der Zukunft zum Ziel gesetzt hat, muss damit rechnen, sehr bald einmal an Leitplanken zu stoßen oder sich besser noch am Zitat des Nobelpreisträgers Niels Bohr (1885–1962) zu orientieren.

„Prognosen sind schwierig – vor allem wenn sie die Zukunft betreffen“

Wie Bild 1.11 verdeutlicht, steht China nach wie vor unangefochten auf Platz eins (aktuell 31%). Zusammen mit Japan und den restlichen asiatischen Ländern entfällt somit **mehr als die Hälfte der weltweiten Produktion auf Asien**. In Zahlen ausgedrückt produzierte China allein mehr als 100 Mio. t. in 2019. Was Europa betrifft, sank sein Anteil verglichen mit 2013 von 20% auf nur noch knapp 16%.

China allein
mehr als
100 Mio. t.

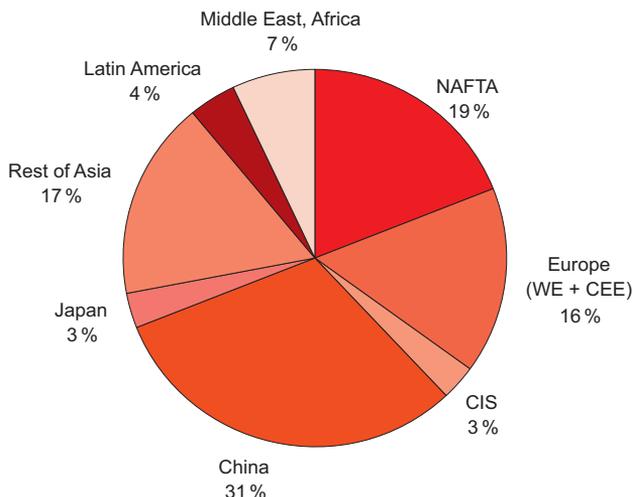


Bild 1.11: Aktuelle Ausgangslage 2019. Weltproduktion von Kunststoff-Werkstoffen nach Regionen (inkl. Duroplaste, Elastomere, Klebstoffe, Beschichtungen, Dichtungsmaterial und PP-Fasern. Nicht enthalten PET-, PA- und PAN-Fasern). WE (Western Europe): EU 15 + CH + N (+ Malta + Cyprus); CE (Central Europe). CIS (GUS): Gemeinschaft unabhängiger Staaten.

Quelle: **PlasticsEurope, Business Data and Charts 2019**

Angesichts der Tatsache, dass es vielfach in der Vergangenheit zu etlichen Fehlprognosen kam (man denke nur an die irrtümliche Voraussage der schwindenden Bedeutung von Kunststoffen wie Polyethylen, PE, oder Polypropylen, PP) oder für 2019: „Künstliche Intelligenz übernimmt die Herrschaft“, sollte daher jede weitere Prognose mit einem gewissen Vorbehalt versehen werden. Wunschenken und Tatsachen sind eben nicht immer kongruent. Nichtsdestotrotz sei der Versuch gewagt, mittels der Prognostik zu einigen Punkten eine oder mehrere Aussagen zu machen.

1.4.1 Zukünftiger Pro-Kopf-Verbrauch von Kunststoff-Werkstoffen

abnehmende
Akzeptanz des
Werkstoffs
Kunststoff

Bild 1.12 entstammt einer Publikation der Chemischen Werke Hüls AG aus den achtziger Jahren des vergangenen Jahrhunderts und beziffert den weltweiten Kunststoffverbrauch im Jahr 2100 auf knapp 800 Mio. t. Verglichen mit der ausgewiesenen Produktion im 2019 scheint diese Zahl aus heutiger Sicht reichlich untertrieben, vgl. Bild 1.4. Nicht untertrieben ist hingegen der weiterhin *schwindende Anteil Europas* an der Weltproduktion von Kunststoffen, verstärkt durch die abnehmende Akzeptanz des Werkstoffs Kunststoff im Alltag der Bevölkerung. Der mittlere Pro-Kopf-Verbrauch in einigen Industrie-Ländern liegt aktuell bei einem Wert von rund 100 kg/Jahr und wird vermutlich - was Europa betrifft - im besten Fall dort verharren. Ausgehend von den vorliegenden Fakten wird somit das wirtschaftliche Wachstum in Asien jegliche Art von Prognosen massiv beeinflussen. Eine exakte Vorhersage für den zukünftigen Pro-Kopf-Verbrauch auf längere Sicht bleibt infolgedessen im Dunkeln. Gesichert scheint „als Trost“ lediglich die berechnete Annahme, dass bis Ende dieses Jahrhunderts die im Bild 1.12 prognostizierten 800 Mio. t. längst erreicht sind oder sogar bereits die Milliardengrenze überschritten wurde.

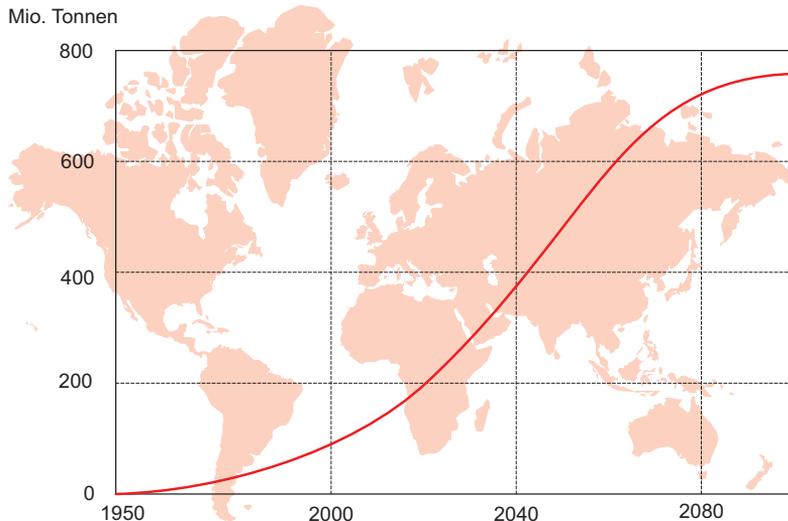


Bild 1.12: Welt-Kunststoff-Verbrauch (nach Teitge)

Quelle: Chemische Werke Hüls AG

1.4.2 Erwartungen an Polymere

Ausgewählt aus unterschiedlichen Forschungsgebieten finden sich nachfolgend Themen in denen aufgezeigt wird, mit welchen Entwicklungsschritten in den nächsten ein bis drei Jahrzehnten zu rechnen sein wird. Dementsprechend kann diese Auswahl als rein zufällig bezeichnet werden und kann einzig den Anspruch erfüllen: Neben wissenschaftlicher Neugierde zu wecken, die Chemie als Multitalent zur Erfüllung der Ansprüche im Leben eines modernen Menschen zu schätzen

Chemie als
Multitalent

Mikrobielle Ökologie

- Mit der Sesshaftigkeit der Menschheit vor rund 10'000 Jahren ging die Nutzung der Landwirtschaft und Viehzucht einher. Dabei lernte der Einzelne im Laufe der Zeit Mikroorganismen (Pilze u. a. Hefen sowie Bakterien) vermehrt als Helfer für neue Nahrungsquellen zu gebrauchen, z. B. Gärung; in neuerer Zeit biologische Kläranlagen. Extrapoliert aus modernen mikrobiologischen Forschungsergebnissen lautet das Schlagwort: *Mikroben für neue Wege zur biologischen Sanierung von Abfallstoffen, incl. Plastikmüll*. Die stoffliche Entsorgung von schwer abzubauenen Kunststoffen wie Polyethylen, PE, oder Polypropylen, PP, (beide aus Kohlenstoffketten garniert mit Wasserstoffatomen bestehend) zeitigte bereits erste Erfolge. Der Durchbruch gelang mit Hilfe neu entdeckter Bakterien und Pilze, deren Enzyme in der Lage sind auch nicht Sauerstoff enthaltende Makromoleküle abzubauen zu können bzw. für ihren eigenen Stoffwechsel zu nutzen, z. B. *Bacillus subtilis*. Vice versa: Mikroben zur Herstellung von neuartigen echten Bio-Kunststoffen, vgl. Abschnitt 1.4.3.

Mikroben

4D(t)-Druck

- Vergleichsweise mit einem Kinderluftballon, der nur aufgeblasen Sinn macht, existieren für Kunststoffe durch entsprechende Vorbehandlungen seit langem ähnliche Möglichkeiten, z. B. für Schrumpfschläuche in Kombination mit *zeitabhängiger (t)* Wärmezufuhr von außen. Der „kleine“ Unterschied: Irreversibel bei Schrumpfschläuchen! Infolgedessen stellt sich die Frage ob für feste Bauteile oder Halbzeug aus Kunststoff die gleiche oder sogar eine verbesserte *Reversibilität* im Vergleich mit dem Gummiballon möglich ist? Was den 4D(t)-Druck an dieser Stelle besonders attraktiv macht, resultiert aus der nahezu unbegrenzten Formenvielfalt dank dem 3D-Druck. An Anwendungen für diese revolutionäre Art des 3D-Drucks in großem Stil besteht kein Mangel. Beispielsweise die reversible Fertigung platzsparender Teile bis zu ihrem Gebrauch mit vergrößertem Volumen und zurück; evtl. auch in Kombination mit bereits vorhandenen Formgedächtnispolymeren. Trotz erster erfolgversprechender Entwicklungen verbleibt hier noch ein offenes Forschungsfeld oder anders ausgedrückt: es lässt sich ein enormes Entwicklungspotential für ausgereifte Produkte orten, vgl. Abschnitt 3.5.11.5.

zeitabhängiger(t)
Wärmezufuhr

Formgedächtnispolymeren

Neue Arten zur Nutzung der Sonnenenergie

- Mit der vermehrten Nutzung der Sonnenenergie beschäftigen sich seit längerer Zeit weltweit viele Institute. Vielversprechend tönen Verfahren, bei denen sich der Klimasünder CO₂ dank seines Gehalts an Kohlenstoff unerwartet als ein begehrter Rohstoff der Zukunft entpuppt. Voraussetzung dafür ist (einer Lupe ähnlich) beispielsweise die Fokussierung des Sonnenlichts zur Nutzung als extrem heiße Energiequelle in Kombination mit CO₂ und Wasser. Ein an der ETH Zürich entwickeltes und bereits erprobtes Verfahren basiert auf CO₂ und H₂O aus der Luft, bei 1500 °C chemisch in einem Solarreaktor zu *Syngas* umgewandelt, einer Mischung aus H₂ und CO. Diese durch die Fischer-Tropsch-Synthese bereits bekannte Gasmischung, angereichert mit zusätzlichem H₂ sowie in Anwesenheit von Katalysatoren reagiert vorwiegend zu Alkanen und Alkenen

Syngas

Kunststoff aus
Luft

im Benzinbereich unter Abscheidung von Wasser. Von dort aus ist der Weg zur Erzeugung von *Kunststoff aus Luft* in Anlehnung an das Schlagwort *Benzin aus Luft* technisch kein Problem, vgl. Abschnitt 1.4.3.



Nanotechnologie

- *Personal Manufacturing Units (PMU)*, auch als „persönliche Fertigungseinheiten“ bezeichnet, ermöglicht jedes gewünschte Produkt mit Hilfe eines dem 3D-Druck ähnlichen Verfahren zusammenzubauen. Allerdings mit dem Unterschied, dass sich das Baumaterial auf atomarer Ebene wiederfindet, d. h. einzelne Atome zur Fertigung dienen. Zugleich könnte hierdurch das Abfallproblem elegant gelöst werden, indem das Produkt nur für einen gewünschten Zeitraum gefertigt wird. Nach Ablauf der im Voraus definierten Zeitspanne übernimmt das *reverse manufacturing*, „Rückentwicklung“ die Aufgabe das nanotechnologische Produkt wieder in seine Atome zu zerlegen und dementsprechend ohne Umweltbelastung zu entsorgen, vgl. Abschnitt 15.3.

*reverse manu-
facturing*,
„Rückentwicklung“
ohne Umwelt-
belastung

Supraleitersubstanz (Polymer?)

- Es wird eine Supraleitersubstanz (Polymer?) entwickelt, deren Sprungtemperatur bei Normaltemperatur liegt; erwarteter Zeitraum 2021 bis 2025. Diese Aussage entstammt „Delphi 98“, einer Studie im Auftrag des deutschen Bundesministeriums für Bildung, Wissenschaft und Forschung (BMBF), die schon in früheren Auflagen dieses Buches jeweils an dieser Stelle zitiert wurde. Wobei zu bemerken ist, dass „Delphi 98“ in vielen Vorhersagen richtig lag, vgl. Abschnitt 15.1.

Sprungtem-
peratur bei
Normal-
temperatur

Das zukünftige Puzzle mit den chemischen Elementen:

- Zumindest aus Sicht der theoretischen Chemie besteht kein Einwand neben den bisherigen auch noch weitere chemische Elemente (s. Periodensystem) für zukünftige Entwicklungen im Bereich der Kunststoffe bzw. bei den Polymeren einzubinden. Beispielsweise vermehrt die seltenen Erden und Halbmetalle oder im Extremfall sogar die Edelgase (s. Argon-Schweißen). Es bleibt daher für Spannung weiterhin gesorgt, vgl. Anfang Kapitel 2.

Extremfall
sogar die
Edelgase

Grüne Chemie

- Ursprünglich nicht vorgesehen, doch aus aktuellem Anlass wird an dieser Stelle ein Thema aufgefrischt, das bereits seit Jahrzehnten der chemischen Industrie den Weg weist und bei der laufenden „Plastik-Diskussion“ fast nie zu Wort kommt. 1998 formulierten und veröffentlichten Paul Anastas und John Ch. Warner „12 Grundprinzipien der Grünen Chemie“ (12 Principles of Green Chemistry). Im Zentrum steht das Bemühen die Umweltverschmutzung einzudämmen, die Energieeffizienz zu steigern um schlussendlich möglichst umweltverträglich zu produzieren. Da die Beseitigung noch besser Vermeidung von Abfällen sowie die Energieeffizienz zu optimieren nicht zuletzt im ureigenen Interesse liegt, stießen diese Leitsätze auch bei der kunststofferzeugenden Industrie auf offene Ohren. Äußerliches Merkmal ist der „Wöhler-Preis für Nachhaltige Chemie“, der durch die Gesellschaft Deutscher Chemiker (GDCh) seit 1998 jährlich verliehen wird. Anfänglich unter dem Namen: „ressourcenschonende Prozesse“. Vieles wurde in der Zwischenzeit getan. Indes bleibt auch hier noch viel zu tun, vgl. Kapitel 16 und 17.

12 Principles
of Green
Chemistry
Vermeidung
von Abfällen
Energieeffizienz
zu optimieren

Klebstoffe, Beschichtungen (inkl. Farben und Lacke), Dichtungsmaterial und Fasern (beispielsweise aus Polyamid, PA, oder Polypropylen, PP)

- Der Schlussreigen gebührt an dieser Stelle der unglaublichen Vielfalt an Polymeren, die hier Verwendung finden. Auch wenn aus Platzgründen diese Stoffklassen nicht