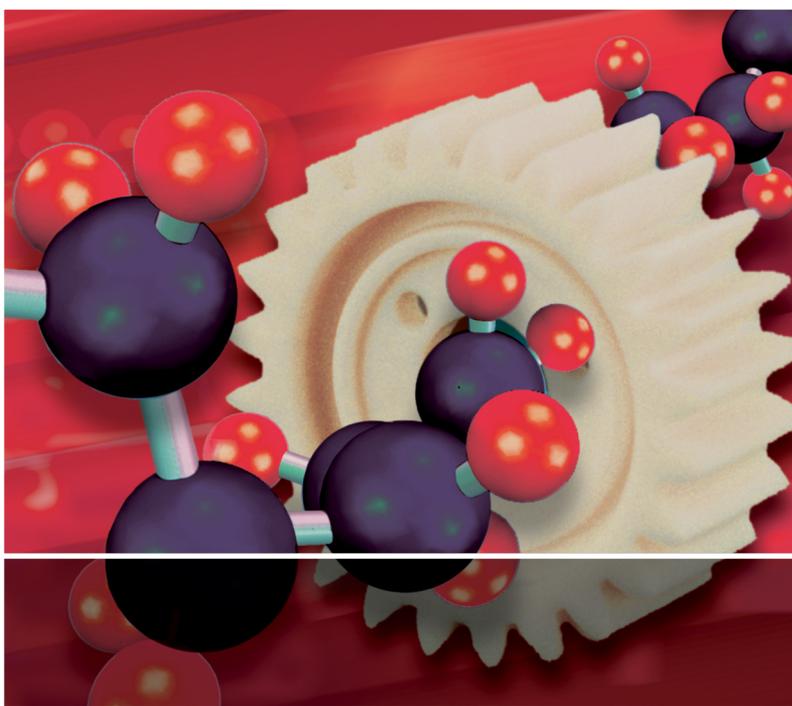


Wolfgang Kaiser

# Kunststoffchemie für Ingenieure

Von der Synthese bis zur Anwendung



4., neu bearbeitete und erweiterte Auflage

HANSER



**Blieben 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](http://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

4., neu bearbeitete und erweiterte Auflage

HANSER

Der Autor:

*Prof. Dr. Wolfgang Kaiser*, ETH Hönggerberg, Institut für Polymere, 8093 Zürich, Schweiz

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:

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

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

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

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

© 2016 Carl Hanser Verlag München

[www.hanser-fachbuch.de](http://www.hanser-fachbuch.de)

Lektorat: Ulrike Wittmann

Herstellung: Jörg Strohbach

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

Coverrealisierung: Stephan Rönigk

Satz: Beltz Bad Langensalza GmbH, Bad Langensalza

E-Book

E-Book-ISBN: 978-3-446-44774-5

# Vorwort zur vierten Auflage

„Well, nobody's perfect!“, tönt es zum Schluss im Kultfilm „Some like it hot“ („Manche mögen's heiß“). Ein kurzer Blick auf den Mittelteil im Impressum dieses Buches (Seite vis-à-vis) vergegenwärtigt, dass diese aufmunternden Worte auch im Bereich der Fachbücher – selbst für eine vierte Auflage – nicht fehl am Platz sind. Überdies erweist sich der Filmtitel „Manche mögen's heiß“ auch als wichtiges Kriterium bei der Auswahl von Kunststoffen was ihre Temperaturbeständigkeit betrifft. Im speziellen gilt dies für Hochleistungskunststoffe. Allerdings kann hier der Vermerk: „doch nur mit Maß und Ziel“ nicht schaden. Seit dem Erscheinen der ersten Auflage (Herbst 2005) sind ziemlich exakt zehn Jahre vergangen. Grund genug, dem zentralen Anspruch dieses Fachbuches auch in der vierten Auflage erneut gebührend Rechnung zu tragen: **Aktualisierte Grundlagen praxisnah vermitteln**. Selbstredend hätten diese anspruchsvollen und umfangreichen Anpassungen nicht im gleichen Maße aufs Neue vorgenommen werden können, wenn der Verfasser nur auf sich allein gestellt gewesen wäre.

Zuallererst gilt somit mein ganz besonderer Dank den Herren Prof. Dr. Paul Smith (ETH Zürich), Prof. Dr. Walter Caseri (ETH Zürich), Prof. Dr. Theo Tervoort (ETH Zürich), Prof. Dr. Erich Kramer (FH Nordwestschweiz), Dr. Peter Attenberger (Vinnolit), Dr. Harald Geisler (DIK Hannover), Dipl.-Ing. Georg Haberl (Vinnolit), Dr. Wilfried Haese (Bayer MaterialScience), Dr. Manfred Hewel (EMS Chemie), Dr. Oliver Jünger (Celanese), Dr. Klaus Kurz (Celanese), Dipl.-Ing. Eduard Maurer (Emaform), Dr. Martin Roth (ehemals Huntsman), Dr. Daniel Sandholzer (Borealis) und Dipl.-Ing. Michael Schäfer (Celanese). Sie alle haben mit viel Engagement, Zeit, Mühe und Sachverstand die einzelnen Kapitel kritisch durchgesehen und wo nötig Korrekturen und wertvolle Ergänzungen vorgenommen.

Ein weiterer Dank geht an zahlreiche Leser, darunter viele Kollegen von anderen Universitäten, Technischen Hochschulen oder Fachhochschulen sowie Studierende, die mich auf Schreibfehler oder sonstige Fehler hingewiesen und/oder Verbesserungsvorschläge gemacht haben. In gewohnt routinierter Weise aber auch mit viel Hingabe und Begeisterung wurde ich erneut von Herrn Dipl.-Ing. Stephan Tanner (bzb Buchs/SG) bei der elektronischen Aufbereitung von chemischen Formeln, Bildern (Zeichnungen) und Tabellen unterstützt.

Nicht zuletzt gebührt auch dieses Mal allen Mitarbeitenden des Carl Hanser Verlags, die an der Herstellung dieses Buches beteiligt waren, ein ganz großes Dankeschön, namentlich richtet sich dieser Dank an meine Lektorin Frau Ulrike Wittmann, Herrn Dr. Mark Smith und Herrn Jörg Strohbach.

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



## Prof. Dr. Phil. II Wolfgang Kaiser

Wolfgang Kaiser studierte und promovierte am Chemischen Institut der Universität Zürich. Anschließend folgten mehrere Jahre Industrietätigkeit im Bereich F+E auf dem Gebiet der Additive (J.R. Geigy AG, Basel). Danach die Berufung zum Professor an die FH Nordwestschweiz (ehemals HTL Brugg-Windisch).

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

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

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

Anlässlich seines 70. Geburtstags 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 Hundertschaften von Ingenieuren in Windisch, in späteren Jahren auch am Departement Materialwissenschaft der ETH Zürich. Daneben übernahm er „berufsbegleitend“ den Aufbau und Betrieb des Kunststoff-Ausbildungs- und Technologie-Zentrums (KATZ) in Aarau und war dessen langjähriger erster Geschäftsführer in Personalunion. Er ist Begründer einer systematischen Aus- und Weiterbildung in Kunststofftechnik für Ingenieure in der Schweiz.

Wolfgang Kaiser ist darüber hinaus Autor und Koautor 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“, 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 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: „Arbeitssicherheit, Gesundheits- und Umweltschutz beim Umgang mit 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: Methylmetacrylat, Name des Polymeren: Polymethylmetacrylat. 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 0.1 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 0.2. Weitere Kennzeichnungen betreffen die Art und Menge an Zusatzstoffen oder Formteile hinsichtlich Recycling, vgl. Abschnitt 16.3.5.
Kurzzeichen nach DIN EN ISO 1043	
Elastomere Kurzzeichen nach DIN ISO 1629	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 (DIN 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 DIN ISO 1629. Beispiele dazu finden sich bei den Elastomeren in Kapitel 13.
Polymerblends Kurzzeichen nach DIN 16780	Für die Bezeichnung duroplastischer Formmassen bestand lange Zeit die „Typisierung“ nach DIN 7708. Durch Übernahme der ISO-Normen wurde 7708 nicht nur ersetzt sondern wesentlich geändert, z. B. durch DIN EN ISO-Norm 14526 (PF), 14527 (UF), 14528 (MF), 14529 (MP), 14530 (UP) und 15252 (EP). Die Kurzzeichen von Polymerblends, Gemischen aus verschiedenen Polymeren (Polymerlegierungen), werden nach DIN 16780 so gebildet, dass die Grundpolymere durch ein Pluszeichen, jedoch ohne Leerzeichen und Klammern verbunden werden; z. B. die Mischung aus Polypropylen (PP) und Ethylen/Propylen-Dien (EPDM) wird mit PP+EPDM bezeichnet.

Tabelle 0.1: Kurzzeichen für wichtige Kunststoffe

Symbol	Kunststoff	Symbol	Kunststoff
ABS	Acrylnitril-Butadien-Styrol	PEUR	Polyetherurethan
AMMA	Acrylnitril-Methylmethacrylat	PF	Phenol-Formaldehyd
ASA	Acrylnitril-Styrol-Acrylat	PHA	Polyhydroxyalkanoat
CA	Celluloseacetat	PHB	Polyhydroxybutyrat
CAB	Celluloseacetobutyrat	PI	Polyimid
CAP	Celluloseacetopropionat	PIB	Polyisobutylen
CF	Kresol-Formaldehyd	PK	Polyketon
CN	Cellulosenitrat	PLA	Polylactid
COC	Cycloolefin-Copolymer	PMI	Polymethacrylimid
CP	Cellulosepropionat	PMMA	Polymethylmethacrylat
E/P	Ethylen-Propylen-Copolymer	PMMI	Polymethacrylmethylimid
EIM	Ionomer-Copolymer	PMP	Poly-4-methylpenten-(1)
ECTFE	Ethylen-Chlortrifluorethylen	PMPI	Poly-m-phenylenterephthalamid
ETFE	Ethylen-Tetrafluorethylen	POM	Polyoxymethylen (Polyformaldehyd, Polyacetal)
EVAC	Ethylen-Vinylacetat	PP	Polypropylen
EVAL	Ethylen-Vinylalkohol	PPE	Polyphenylenether
EP	Epoxid	PPP	Poly-para-Phenylen
LCP	Flüssigkristall-Polymer	PPS	Polyphenylsulfid
MABS	Methacrylat-Acrylnitril-Butadien-Styrol	PPSU	Polyphenylsulfon
MBS	Methacrylat-Butadien-Styrol	PPTA	Poly-p-phenylenterephthalamid
MF	Melamin-Formaldehyd	PPV	Polyphenylvinylen
MP	Melamin-Phenol-Formaldehyd	PPY	Polypyrrrol
PAEK	Polyaryletherketon	PS	Polystyrol
PAC	Polyacetylen	PS-S	Polystyrol, syndiotaktisch
PA	Polyamid	PSU	Polysulfon
PAI	Polyamidimid	PT	Polythiophen
PAN	Polyacrylnitril	PTFE	Polytetrafluorethylen
PANI	Polyanilin	PUR	Polyurethan
PAR	Polyarylat	PVAL	Polyvinylalkohol
PARA	Polyarylamid	PVAC	Polyvinylacetat
PB	Polybuten	PVC	Polyvinylchlorid
PBI	Polybenzimidazol	PVDC	Polyvinylidenchlorid
PBMI	Polybismaleinimid	PVF	Polyvinylfluorid
PBT	Polybutylenterephthalat	PVDF	Polyvinylidenfluorid
PC	Polycarbonat	SB	Styrol-Butadien
PCTFE	Polychlortrifluorethylen	SMS	Styrol-a-Methylstyrol
PDAP	Polydiallylphthalat	SAN	Styrol-Acrylnitril
PE	Polyethylen (Polyethen)	SI	Silikon
PE-C	Polyethylen, chloriert	TPE	Thermoplastische Elastomere
PEBA	Polyether-Block-Amid	TPA	– auf Basis Polyamid
PEEK	Polyetheretherketon	TPC	– auf Basis Copolyester
PEI	Polyetherimid	TPO	– auf Basis von Olefinen
PEK	Polyetherketon	TPS	– auf Basis Styrol
PEN	Polyethylenaphthalat	TPU	– auf Basis Polyurethan
PEOX	Polyethylenoxid	TPV	– auf Basis von vernetztem Kautschuk
PESI	Polyesterimid	TPZ	weitere thermoplastische Elastomere
PES	Polyethersulfon	UF	Urea-Formaldehyd
PET	Polyethylenterephthalat	UP	(Harnstoff-Formaldehyd)
PET-A	Polyethylenterephthalat, amorph	VCE	Ungesättigter Polyester
PET-C	Polyethylenterephthalat, kristallin	VCEVAC	Vinylchlorid-Ethylen-Vinylacetat
PET-G	Polyethylenterephthalat, Glykol-modifiziert		

**Tabelle 0.2:** Kennbuchstaben für besondere Eigenschaften<sup>1)</sup>

Symbol	Bedeutung	Symbol	Bedeutung
A	amorph	N	normal, nukleiert, Novolak
B	bromiert, block, biaxial	O	orientiert
C	chloriert, kristallin	P	weichmacherhaltig, thermoplastisch, plastifiziert
D	Dichte	R	erhöht, Resol, Random, hart
E	expandiert, schäumbar, oxidiert, Elastomere	S	gesättigt, sulfoniert, syndiotaktisch
F	flexibel, flüssig, fluoriert	T	Temperatur(beständig), thermoplastisch, zäh modifiziert
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

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

Beispiele:

PET-A	amorphes Polyethylenterephthalat
PVC-C	chloriertes Polyvinylchlorid
PVC-U	weichmacherfreies PVC
PVC-P	weichmacherhaltiges PVC
PE-X	vernetztes Polyethylen
PS-(H)I	schlagzähes Polystyrol
PE-UHMMW	ultrahochmolekulares Polyethylen
PE-LLD	lineares Polyethylen niedriger Dichte

Zur weiteren Information über Handelsnamen und deren Firmen wird auf M-Base ([www.materialdatacenter.com](http://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. Zudem lässt sich in diesen Datenbanken eine Vielzahl weiterer Informationen abrufen, beispielsweise zur chemischen Beständigkeit von Kunststoffen. Nachfolgend sind exemplarisch die Internetadressen für vier Anbieter von Werkstoffdatenbanken aufgelistet:

CAMPUS ([www.campusplastics.com](http://www.campusplastics.com)); KERN RIWETA ([www.kern.de/kunststoff/service/werkstoffe/eigenschaften](http://www.kern.de/kunststoff/service/werkstoffe/eigenschaften)); Material Data Center ([www.materialdatacenter.com](http://www.materialdatacenter.com).); POLYMAT ([www.polybase.com](http://www.polybase.com)).

# Inhalt

<b>Vorwort zur vierten Auflage</b> .....	V
<b>Prof. Dr. Phil. II Wolfgang Kaiser</b> .....	VII
<b>Hinweise zur Benutzung des Buches</b> .....	IX
<b>1 Einführung</b> .....	1
1.1 Werkstoffklassen .....	1
1.2 Bedeutung der Kunststoffe .....	3
1.2.1 Wachstumsursachen .....	4
1.2.1.1 Die Petrochemie als Rohstofflieferant .....	4
1.2.1.2 Leichtgewicht Kunststoff .....	4
1.2.1.3 Energiegünstiges Verhalten .....	4
1.2.1.4 Komplexe Formteilgeometrien und hoher Automatisierungsgrad .....	5
1.2.1.5 Nutzung von Synergien .....	5
1.2.2 Kunststoffe und die Grundbedürfnisse des Menschen .....	6
1.2.2.1 Nahrung .....	6
1.2.2.2 Gesundheit .....	7
1.2.2.3 Kleidung .....	7
1.2.2.4 Wohnung .....	8
1.2.2.5 Kommunikation .....	8
1.3 Geschichte der Kunststoffe .....	8
1.3.1 Kurzer Abriss der Entwicklung der Polymerwissenschaften (ohne Copolymere und Blends) .....	12
1.4 Zukunft der Kunststoffe – Prognosen .....	23
1.4.1 Zukünftiger Pro Kopf-Verbrauch von Kunststoff-Werkstoffen .	24
1.4.2 Erwartungen an Polymere .....	25
1.4.3 Zukünftige Rohstoffquellen .....	25
1.5 Wirtschaftsdaten und Grafiken zu Kunststoffen .....	28
1.5.1 Einteilung der Kunststoffe nach Bedarf und Anwendungsgebieten .....	28
1.5.2 Einteilung der Kunststoffe nach ihrem Eigenschaftsprofil .....	28
<b>2 Grundlagen</b> .....	33
2.1 Was sind Kunststoffe .....	34

2.1.1	Einteilung der Kunststoffe .....	37
2.1.2	Makromolekül-Architektur/Topologie .....	38
2.2	Bildungsreaktionen für Makromoleküle – Polyreaktionen .....	41
2.2.1	Kettenpolymerisation .....	42
2.2.1.1	Radikalische Kettenpolymerisation .....	43
2.2.1.2	Kationische Kettenpolymerisation .....	46
2.2.1.3	Anionische Kettenpolymerisation .....	48
2.2.1.4	Koordinative Kettenpolymerisation/Polyinsertion ..	50
2.2.1.5	Homo- und Copolymerisate .....	51
2.2.1.6	Chemische Vernetzung durch Kettencopolymerisation .....	53
2.2.1.7	Verfahrenstechnik der Kettenpolymerisation .....	53
2.2.1.8	Plasmapolymerisation .....	58
2.2.2	Kondensationspolymerisation (Polykondensation) .....	58
2.2.3	Additionspolymerisation (Polyaddition) .....	62
2.2.4	Verfahrenstechnik der Kondensationspolymerisation und Additionspolymerisation .....	63
2.2.5	Einteilung nach dem Typ der Aufbaureaktionen .....	64
2.2.6	Chemische Umsetzungen an Makromolekülen .....	65
2.2.6.1	Vergrößerung des Polymerisationsgrads .....	65
2.2.6.2	Beibehaltung des Polymerisationsgrads .....	65
2.2.6.3	Verringerung des Polymerisationsgrads .....	66
2.2.6.4	Chemische Umsetzungen an makromolekularen Naturstoffen .....	66
2.3	Bindungskräfte in makromolekularen Systemen .....	67
2.3.1	Hauptvalenzbindungen .....	67
2.3.2	Nebervalenzbindungen .....	70
2.3.3	Ionenbindungen .....	74
2.3.4	Mechanische Bindungen .....	74
2.4	Strukturmerkmale von Kunststoffen .....	75
2.4.1	Chemische Struktur .....	76
2.4.1.1	Konstitution .....	76
2.4.1.2	Konfiguration .....	82
2.4.2	Festkörperstruktur .....	84
2.4.2.1	Räumliche Anordnung eines Makromoleküls .....	84
2.4.2.2	Räumliche Anordnung mehrerer Makromoleküle zu einem Verband .....	85
2.4.2.3	Kristallinität .....	88
2.4.3	Mittlere Molmasse $\bar{M}$ und Molmassenverteilung .....	90
2.4.3.1	Kettenlänge .....	90
2.4.3.2	Molmasse $M$ bei niedermolekularen Verbindungen	91