

In der Kunststoffindustrie ist es allgemein üblich, Kunststoffe einer chemischen Familie zuzuordnen und über das Kurzzeichen dieser Familie zu identifizieren. Diese Praxis ist allgemein verbreitet, obwohl sie streng genommen nicht den Realitäten der Kunststoffbranche entspricht, weil letztendlich die Produkte als Handelsprodukte mit jeweils sehr spezifischem Eigenschaftsspektrum verkauft werden. Dabei ist der Handelsname (fast im Sinne einer Bestellnummer) das einzige identifizierende Kriterium. Normen, die die Eigenschaften von bestimmten Werkstoffklassen festlegen, wie sie im Metallsektor weit verbreitet sind, sind nur bei härtbaren Kunststoffen eingeführt. In der Regel streuen die Eigenschaften der Werkstoffe innerhalb einer Familie erheblich.

Trotzdem ist es unumgänglich im Sinne einer Strukturierung des Fachwissens, dass die Werkstoffe in einer logischen und nachvollziehbaren Weise kategorisiert werden.

In diesem Buch soll daher die verbreitete Methode der Kurzzeichen aufgegriffen werden. Dabei muss ein Kompromiss gefunden werden zwischen einer eindeutigen und starren Regeln folgenden Systematik und im Markt eingeführten und weit verbreiteten Bezeichnungen. Es gibt verschiedene Normen, welche die Kennzeichnung der Kunststoffe zum Inhalt haben. Sie sind aber leider nicht nur untereinander, sondern teilweise sogar in sich inkonsequent und widersprüchlich.

In Abschnitt 1.1 sind die Kurzzeichen der in diesem Buch behandelten Kunststoffe zusammengefasst. Dabei wird vorzugsweise nur der chemische Aufbau der Polymere berücksichtigt und Zusätze, die sich auf physikalische Eigenschaften oder Verarbeitungsverfahren beziehen, werden möglichst vermieden. Da aber in der Fachliteratur häufig derartige Benennungen (z.B. „A“ für amorph oder „B“ für Block-Copolymere) verwendet werden, kann hier nicht ganz darauf verzichtet werden. Wegen der fehlenden Allgemeingültigkeit und vieler Widersprüche ist aber davon abzuraten, diese zu verwenden.

Die Liste der in Tabelle 1.1 fett gedruckten und somit als Norm definierten Familienbezeichnungen greift auf einen Vorschlag zurück, der im Zusammenhang mit der Kunststoffdatenbank CAMPUS gemacht wurde. Dieser berücksichtigt die

vorliegenden ISO-Normen so weit wie möglich, akzeptiert aber auch Ausnahmen, wenn sie allgemein verbreitet sind. Für CAMPUS wurde auf diese Weise eine Liste von so genannten Basispolymeren definiert, mit der fast der gesamte Kunststoffmarkt abgedeckt werden kann. Diese Liste wird regelmäßig überprüft und gegebenenfalls erweitert.

Tabelle 1.1 enthält Kurzzeichen für Kunststoffe und Kautschuke, Tabelle 1.2 Kurzzeichen für *Weichmacher*.

■ 1.1 Alphabetische Gliederung verwendeter Kurzzeichen für Kunststoffe, chemische Bezeichnung

Tabelle 1.1 Kunststoffe und Kautschuke

Kurzzeichen	Chemische Bezeichnung	Abschnitt
*	Pyrrone	6.16
*	Polycyclone	6.16
*	Polyphenylene (Polyarylen)	6.16
*	Polytriazine	6.14.1.4
ABS	Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymer	6.3.2
ACM	Acrylat-Kautschuk, (AEM, ANM)	6.22.4
ACS	Acrylnitril-chloriertes Polyethylen-Styrol	6.3.2
AECM	Acrylester-Ethylen-Kautschuk	6.22.4
AEM	Acrylat-Ethylen-Polymethylen-Kautschuk	6.22.4
AES	Acrylnitril-Ethylen-Propylen-Dien-Styrol-Copolymer	6.3.2
AFMU	Nitroso-Kautschuk	6.22.8
AMMA	Acrylnitril-Methylmethacrylat	6.6.2.2
APE-CS	siehe ACS	
ASA	Acrylnitril-Styrol-Acrylester-Copolymer	6.3.2
AU	Polyesterurethan-Kautschuk	6.22.8
BIIR	Brombutyl-Kautschuk	6.22.3
BR	Butadien-Kautschuk	6.22.3
CA	Celluloseacetat	6.18.1
CAB	Celluloseacetobutyrat	6.18.1
CAP	Celluloseacetopropionat	6.18.1
CF	Kresol-Formaldehyd-Harz	6.20
CH	hydratisierte Cellulose, Zellglas	6.18.1
CIIR	Chlorbutyl-Kautschuk	6.22.3
CM	chlorierter Polyethylen-Kautschuk	6.22.4

Kurzzeichen	Chemische Bezeichnung	Abschnitt
CMC	Carboxymethylcellulose	6.18.1
CN	Cellulosenitrat, Celluloid	6.18.1
CO	Epichlorhydrin-Kautschuk	6.22.5
COC	Cyclopolyolefin-Copolymere	6.2.4
COP	COC-Copolymerisat	6.2.4.6
CP	Cellulosepropionat	6.18.1
CR	Chloropren-Kautschuk	6.22.3
CSF	Casein-Formaldehyd-Harz, Kunsthorn	6.18.3
CSM	chlorsulfonierter Polyethylen-Kautschuk	6.22.4
CTA	Cellulosetriacetat	6.18.1
E/P	Ethylen-Propylen-Copolymer	6.2.4
EAM	Ethylen-Vinylacetat-Kautschuk	6.22.4
EAMA	Ethylen-Acrylsäureester-Maleinsäureanhydrid-Copolymer	6.2.4
EB	Ethylen-Buten-Copolymer	6.2.4
EBA	Ethylen-Butylacrylat-Copolymer	6.2.4
EC	Ethylcellulose	6.18.1
ECB	Ethylencopolymer-Bitumen-Blend	6.2.4
ECO	Epichlorhydrin-Kautschuk	6.22.5
ECTFE	Ethylen-Chlortrifluorethylen-Copolymer	6.2.4
EEAK	Ethylen-Ethylacrylat-Copolymer	6.2.4
EIM	Ionomer-Copolymer	6.2.4
EMA	Ethylen-Methacrylsäureester-Copolymer	6.2.4
EP	Epoxid-Harze	6.20
EP(D)M	siehe EPDM	
EPDM	Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk	6.22.4
EPM	Ethylen-Propylen-Kautschuk	6.22.4
ET	Poly-ethylenoxid-tetrasulfid-Kautschuk	6.22.7
ETER	Epichlorhydrin-Ethylenoxid-Kautschuk (Terpolymer)	6.22.5
ETFE	Ethylen-Tetrafluorethylen-Copolymer	6.5.2
EU	Polyetherurethan-Kautschuk	6.22.8
EVAC	Ethylen-Vinylacetat-Copolymer	6.2.4
EVAL	Ethylen-Vinylalkohol-Copolymer, alte Bezeichnung EVOH	6.2.4
FEP	Polyfluorethylenpropylen	6.5.2
FF	Furan-Formaldehyd-Harz	6.20
FFKM	Perfluor-Kautschuk	6.22.4
FKM	Fluor-Kautschuk	6.22.4
FPM	Propylen-Tetrafluorethylen-Kautschuk	6.22.4
FVMQ	Fluor-Silikon-Kautschuk	6.22.6
HCR	Hochtemperatur-vernetzender Silikonkautschuk	6.22.6
HNBR	hydrierter NBR-Kautschuk	6.22.3

Tabelle 1.1 Kunststoffe und Kautschuke (Fortsetzung)

Kurzzeichen	Chemische Bezeichnung	Abschnitt
HTV	siehe HCR	
ICP	intrinsisch leitfähige Polymere	6.18.5
IIR	Butyl-Kautschuk (CIIR, BIIR)	6.22.3
IR	Isopren-Kautschuk	6.22.3
KWH	Kohlenwasserstoffharz	6.21.9
LCP	Liquid Crystal Polymer	6.15
LSR	Flüssigsilikonkautschuk	6.22.6
MABS	Methylmethacrylat-Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymer	6.6.2
MBS	Methacrylat-Butadien-Styrol-Copolymer	6.6.2
MC	Methylcellulose (Cellulosederivat)	6.18.1
MF	Melamin-Formaldehyd-Harz	6.20
MFA	Tetrafluorethylen-Perfluormethyl-Vinylether-Copolymer	6.5.2.7
MMA-EML	Methylmethacrylat-exo-Methylenlacton-Copolymer	6.6.3.3
MPF	Melamin-Phenol-Formaldehyd-Harz	6.20
MQ	Polydimethylsilikon-Kautschuk	6.22.6
MS	siehe PMS	
MUF	Melamin-Harnstoff-Formaldehyd-Harz	6.20
MUPF	Melamin-Harnstoff-Phenol-Formaldehyd-Harz	6.20
NBR	Acrylnitril-Butadien-Kautschuk	6.22.3
NCR	Acrylnitril-Chloropren-Kautschuk	6.22.3
NR	Naturkautschuk	6.22.3
PA	Polyamid (weitere Bezeichnungen siehe Abschnitt 6.7)	6.8
PA 11	Polyamid aus Aminoundecansäure	6.8.1
PA 12	Polyamid aus Dodekansäure	6.8.1
PA 46	Polyamid aus Polytetramethylen-Adipinsäure	6.8.1
PA 6	Polyamid aus ϵ-Caprolactam	6.8.1
PA 610	Polyamid aus Hexamethylendiamin-Sebazinsäure	6.8.1
PA 612	Polyamid aus Hexamethylendiamin-Dodekansäure	6.8.1
PA 66	Polyamid aus Hexamethylendiamin-Adipinsäure	6.8.1
PA 69	Polyamid aus Hexamethylendiamin-Azelainsäure	6.8.1
PAA	Polyacrylsäureester	6.6.1
PAC	Polyacetylen	6.18.5
PAEK	Polyaryletherketon	6.13
PAI	Polyamidimid	6.14.2
PAN	Polyacrylnitril	6.6.1
PANI	Polyanilin, Polyphenylenamin	6.18.5
PAR	Polyarylate	6.9.3.1
PARI	Polyarylimid	6.14.2

Kurzzeichen	Chemische Bezeichnung	Abschnitt
PB	Polybuten	6.2.8
PBA	Polybutylacrylat	6.6.1
PBI	Polybenzimidazol	6.14.1.3
PBMI	Polybismaleinimid	6.14.1.2
PBN	Polybutylennaphthalat	6.9.3.2
PBO	Polyoxadiabenzimidazol	6.14
PBT	Polybutylenterephthalat	6.9.2.2
PC	Polycarbonat (aus Bisphenol-A)	6.9.1.1
PCTFE	Polychlortrifluorethylen	6.5.1
PDAP	Polydiallylphthalat-Harz	6.20.4.5
PDCPD	Polydicyclopentadien	6.2.9.2
PE	Polyethylen	6.2.1
PE-HD	Polyethylen-High Density	6.2.1
PE-HMW	Polyethylen-High Molecular Weight	6.2.1
PE-LD	Polyethylen-Low Density	6.2.1
PE-LLD	Polyethylen-Linear Low Density	6.2.1
PE-MD	Polyethylen-Medium Density	6.2.1
PE-UHMW	Polyethylen-Ultra High Molecular Weight	6.2.1
PE-ULD	Polyethylen-Ultra Low Density	6.2.1
PE-VLD	Polyethylen-Very Low Density	6.2.1
PE-X	Polyethylen, vernetzt	6.2.2
PEA	Polyesteramid	6.15
PEDT	Polyethylendioxythiophen	6.18.5
PEEEK	Polyetheretheretherketon	6.13
PEEK	Polyetheretherketon	6.13
PEEKEK	Polyetheretherketonetherketon	6.13
PEEKK	Polyetheretherketonketon	6.13
PEI	Polyetherimid	6.14.2.2
PEK	Polyetherketon	6.13
PEKEKK	Polyetherketonetherketonketon	6.13
PEKK	Polyetherketonketon	6.13
PEN	Polyethylennaphthalat	6.9.3
PEOX	Polyethylenoxid	6.12
PESI	Polyesterimid	6.15
PES	Polyethersulfon	6.10.2
PESU	siehe PES	
PET	Polyethylenterephthalat	6.9.2.1
PET-G	Polyethylenterephthalat, glykolmodifiziert	6.9.2.1
PF	Phenol-Formaldehyd-Harz	6.20.3.2
PFA	Perfluoralkoxy	6.5.2.4



Tabelle 1.1 Kunststoffe und Kautschuke (*Fortsetzung*)

Kurzzeichen	Chemische Bezeichnung	Abschnitt
PFMT	Polyperfluortrimethyltriazin-Kautschuk	6.22.10
PFU	Polyfuran	6.18.5
PHA	Polyhydroxyalkanoate	6.18.2
PHB	Polyhydroxybutyrat	6.18.2
PHV	Polyhydroxyvaleriansäure	6.18.2
PI	Polyimid	6.14
PIB	Polyisobutylen	6.2.8
PISO	Polyimidsulfon	6.14.2.3
PK	Polyketon	6.18.6
PLA	Polylactid	6.18.4
PMA	Polymethylacrylat	6.6.1
PMI	Polymethacrylimid	6.14.2
PMMA	Polymethylmethacrylat	6.6.2
PMMI	Polymethacrylmethylimid	6.6.3.1, 6.14.2
PMP	Poly-4-Methylpenten-1	6.2.9.1
PMS	Poly- α -Methylstyrol	6.3.1.1
PNF	Fluor-Phosphazen-Kautschuk	6.22.9
PNR	Polynorbornen-Kautschuk	6.22.3
PO	Polypropylenoxid-Kautschuk	6.22.5
PO	Allgemeine Bezeichnung für die Gruppe der Polyolefine, Polyolefin-Derivate und -Copolymeriste	6.2
POM	Polyoxymethylen (Polyacetalharz, Polyformaldehyd)	6.7
PP	Polypropylen	6.2.5
PPA	Polyphthalamid	6.8.3.1
PPB	Polyphenylenbutadien	6.18.5
PPE	Polyphenylenether, alte Bezeichnung PPO	6.11
PPMS	Poly-para-Methylstyrol	6.3.1.1
PPOX	Polypropylenoxid	6.12
PPP	Poly-para-Phenylen	6.18.5
PPS	Polyphenylensulfid	6.10.1
PPSU	Polyphenylensulfon	6.10.2
PPTA	Poly-p-Phenylenterephthalamid	6.8
PPV	Polyphenylenvinylen	6.18.5
PPY	Polypyrrol	6.18.5
PPYR	Polyparapyridin	6.18.5
PPYV	Polyparapyridinvinylen	6.18.5
PS	Polystyrol	6.3.1.1
PSAC	Polysaccharid, Stärke	6.18.1

Kurzzeichen	Chemische Bezeichnung	Abschnitt
PSU	Polysulfon	6.10.2
PT	Polythiophen	6.18.5
PTFE	Polytetrafluorethylen	6.5.1
PTHF	Polytetrahydrofuran	6.12
PTT	Polytrimethylenterephthalat	6.9.2.4
PUR	Polyurethan	6.17
PVAC	Polyvinylacetat	6.4.5
PVAL	Polyvinylalkohol	6.4.5
PVB	Polyvinylbutyral	6.4.5
PVC	Polyvinylchlorid	6.4.1, 6.4.2
PVDC	Polyvinylidenchlorid	6.4.5
PVDF	Polyvinylidenfluorid	6.5.1
PVF	Polyvinylfluorid	6.5.1
PVFM	Polyvinylformal	6.4.5
PVK	Polyvinylcarbazol	6.4.5
PVME	Polyvinylmethylether	6.4.5
PVMQ	Polymethylsiloxan-Phenyl-Vinyl-Kautschuk	6.22.6
PVP	Polyvinylpyrrolidon	6.4.5
PZ	Phosphazene-Kautschuk mit Phenoxygruppen	6.22.9
RF	Resorcin-Formaldehyd-Harz	6.20, 6.21.1
RTV	raumtemperatur-vernetzender Silikonkautschuk	6.22.6
SAN	Styrol-Acrylnitril-Copolymer	6.3.2
SB	Styrol-Butadien-Copolymer	6.3.2
SBMMA	Styrol-Butadien-Methylmethacrylat-Copolymer	6.3.2
SBR	Styrol-Butadien-Kautschuk	6.22.3
SBS	Styrol-Butadien-Styrol-Copolymer	6.3.2
SCR	Styrol-Chloropren-Kautschuk	6.22.3
SEBS	Styrol-Ethenbuten-Styrol-Copolymer	6.3.2
SEPS	Styrol-Ethenpropen-Styrol-Copolymer	6.3.2
SI	Silikone, Silikonharze	6.20
SIMA	Styrol-Isopren-Maleinsäureanhydrid-Copolymer	6.3.2
SIR	Styrol-Isopren-Kautschuk	6.20
SIS	Styrol-Isopren-Styrol-Block-Copolymer	6.3.2.1
SMAB	Styrol-Maleinsäureanhydrid-Butadien-Copolymer	6.3.2
SMAH	Styrol-Maleinsäureanhydrid-Copolymer	6.3.2
TCF	Thiocarbonyldifluorid-Copolymer-Kautschuk	6.22.7
TFEHFPVDF	Tetrafluorethylen-Hexafluorpropylen-Vinylidenfluorid-Copolymer (THV)	6.5.2
TFEP	Tetrafluorethylen-Hexafluorpropylen-Copolymer	6.5.2
TOR	Polyoctamer	6.22.3

Tabelle 1.1 Kunststoffe und Kautschuke (Fortsetzung)

Kurzzeichen	Chemische Bezeichnung	Abschnitt
TPA	thermoplastische Elastomere auf Basis Polyamid	6.19
TPC	thermoplastische Elastomere auf Basis Copolyester	6.19
TPE	thermoplastische Elastomere	6.19
TPE-A	siehe TPA	6.19
TPE-C	siehe TPC	6.19
TPE-O	siehe TPO	6.19
TPE-S	siehe TPS	6.19
TPE-U	siehe TPU	6.19
TPE-V	siehe TPV	6.19
TPO	thermoplastische Elastomere auf Basis von Olefinen	6.19
TPS	thermoplastische Elastomere auf Basis Styrol	6.19
TPU	thermoplastische Elastomere auf Basis Polyurethan	6.19
TPV	thermoplastische Elastomere auf Basis von vernetztem Kautschuk	6.19
TPZ	weitere thermoplastische Elastomere	6.19
UF	Harnstoff-Formaldehyd-Harz	6.20
UP	ungesättigtes Polyester-Harz	6.20
VCE	Vinylchlorid-Ethylen-Copolymer	6.4.3
VCEMAK	Vinylchlorid-Ethylen-Methylmethacrylat-Copolymer	6.4.3
VCEVAC	Vinylchlorid-Ethylen-Vinylacetat-Copolymer	6.4.3
VCMAAN	Vinylchlorid-Maleinsäureanhydrid-Acrylnitril-Copolymer	6.4.3
VCMAH	Vinylchlorid-Maleinsäureanhydrid-Copolymer	6.4.3
VCMAI	Vinylchlorid-Maleinimid-Copolymer	6.4.3
VCMAK	Vinylchlorid-Methacrylat-Copolymer	6.4.3
VCMMMA	Vinylchlorid-Methylmethacrylat-Copolymer	6.4.3
VCOAK	Vinylchlorid-Octylacrylat-Copolymer	6.4.3
VCPAEAN	Vinylchlorid-Acrylatkautschuk-Acrylnitril-Copolymer	6.4.3
VCPE-C	Vinylchlorid-chloriertes Ethylen-Copolymer	6.4.3
VCVAC	Vinylchlorid-Vinylacetat-Copolymer	6.4.3, 6.4.4
VCVDC	Vinylchlorid-Vinylidenchlorid-Copolymer	6.4.3
VCVDCAN	Vinylchlorid-Vinylidenchlorid-Acrylnitril-Copolymer	6.4.3
VDFHFP	Vinylidenchlorid-Hexafluorpropylen-Copolymer	6.4.3
VE	Vinylester-Harz	6.20
VF	Vulkanfiber	6.18.1
VMQ	Polymethylsiloxan-Vinyl-Kautschuk	6.22.6
VU	Vinylesterurethan-Harz	6.20.1.3
XBR	Butadien-Kautschuk, Carboxylgruppenhaltig	6.22.3
XCR	Chloropren-Kautschuk, Carboxylgruppenhaltig	6.22.3
XF	Xylenol-Formaldehyd-Harz	6.20.1.1

Kurzzeichen	Chemische Bezeichnung	Abschnitt
XNBR	Acrylnitril-Butadien-Kautschuk, Carboxylgruppenhaltig	6.22.3
XSBR	Styrol-Butadien-Kautschuk, Carboxylgruppenhaltig	6.22.3

* Für diese Polymere sind keine Kurzzeichen bekannt.

Tabelle 1.2 Weichmacher, gebräuchliche

Kurzzeichen	Chemische Bezeichnung	Kurzzeichen	Chemische Bezeichnung
ASE	Alkylsulfonsäureester	DODP	Diocetyldecylphthalat
BBP	Benzylbutylphthalat	DOP, DEHP	Diocetylphthalat
DBA	Dibutyladipat	DOS	Diocetylsebacat
DBP	Dibutylphthalat	DOZ	Diocetylazelat
DBS	Dibutylsebacat	DPCF	Diphenylkresylphosphat
DCHP	Dicyclohexylphthalat	DPOF	Diphenyloctylphosphat
DEP	Diethylphthalat	DPP	Dipropylphthalat
DHXP	Dihexylphthalat	ELO	Epoxidiertes Leinöl
DIBP	Diisobutylphthalat	ESO	Epoxidiertes Sojabohnenöl
DIDP	Diisodecylphthalat	ODA	Octyldecyladipat
DINA	Diisononyladipat	ODP	Octyldecylphthalat
DMP	Dimethylphthalat	PO	Paraffinöl
DMS	Dimethylsebazat	TBP	Tributylphosphat
DNA	Dinonyladipat	TCEF	Trichlorethylphosphat
DNODP	Di-n-octyl-n-decylphthalat	TCF	Trikresylphosphat
DNOP	Di-n-octylphthalat	TIOTM	Triisooctyltrimellitat
DNP	Dinonylphthalat	TOF	Triocetylphosphat
DOA (DEHA)	Diocetyladipat, auch Diethylhexyladipat, DEHA nicht mehr gebräuchlich	TPP	Triphenylphosphat

1.2 Grundeinheiten, ISO- und US-Einheiten

Längen							
	mm	m	km	in	ft	yd	mile
1 mm	= 1	10 ⁻³	10 ⁻⁶	0,0394	0,0033	-	-
1 m	= 10 ³	1	10 ⁻³	39,37	3,281	1,094	-
1 km	= 10 ⁶	10 ⁻³	1	39 370	3281	1094	0,6214
1 inch (Zoll)	= 25,40	0,0254	-	1	0,0833	0,0278	-
1 foot (Fuß)	= 304,8	0,3048	-	12	1	0,3333	-
1 yard	= 914,4	0,9144	-	36	3	1	-
1 statute mile (Landmeile)	=	1609	1,609	-	5280	1760	1

Flächen							
	cm ²	m ²	a	ha	km ²	in ²	ft ²
1 cm ²	= 1	10 ⁻⁴	-	-	-	0,155	-
1 m ²	= 10 ⁴	1	0,01	10 ⁻⁴	10 ⁻⁶	1550	10,76
1 a	= -	100	1	0,01	10 ⁻⁴	-	1076
1 ha	= -	10 ⁴	100	1	0,01	-	-
1 km ²	= -	10 ⁶	10 ⁴	100	1	-	-
1 square inch	= 6,452	-	-	-	-	1	-
1 square foot	= 929	0,0929	-	-	-	144	1
1 square yard	=						

Volumen							
	cm ³	dm ³	m ³	in ³	ft ³	yd ³	gal (US) ²⁾
1 cm ³	= 1	10 ⁻³	10 ⁻⁶	0,061	-	-	-
1 dm ³ ¹⁾	= 10 ³	1	10 ⁻³	61,02	0,0353	-	0,2642
1 m ³	= 10 ⁶	10 ³	1	61023	35,31	1,308	264,2
1 cubic inch	= 16,39	0,0164	-	1	-	-	-
1 cubic foot	= -	28,32	0,0283	1728	1	0,037	7,841
1 cubic yard	= -	764,6	0,7646	46656	27	1	202
1 gallon (US)	= 3785	3,785	-	281	0,1337	-	1

¹⁾ 1 Liter (l) = 1,0 dm³

Kraft							
		N		dyn ²		kp	
Newton	1 N	=	1	10 ⁵		0,101972	
Kilopond ¹⁾	1kp	=	9,80665	980 665		1	
pound-force	1 lbf	=	4,44822			0,4536	kilogramme-force (kgf) = kp

¹⁾ Einheit nicht mehr zugelassen

Masse											
		g		kg		t		oz		lb	
1 g	=	1	10 ⁻³		10 ⁻⁵		0,0353				
1 kg	=	10 ³	1		10 ⁻³		35,27		2,205		
1 t	=	10 ⁶	10 ³		1		-		2205		
1 ounce (oz)	=	28,35	0,0284		-		1		0,0625		
1 pound (lb)	=	453,6	0,4536		-		16		1		

Metrisches Karat 1 k = 0,200 g bei Edelsteinen. Das Wort „Karat“ bedeutet bei Goldlegierungen

$\frac{1}{24}$ Masseanteil Gold grain 1 gr = ($\frac{1}{700}$) lb = 0,0648 g

Druck														
		Pa = N/m ²		bar		kp/cm ² = at		atm		Torr		lbf/in ²		
1 Pa = 1 N/m ²	=	1	10 ⁻⁵		10,2 · 10 ⁻⁶		9,869 · 10 ⁻⁶		7,5 · 10 ⁻³		145,05 · 10 ⁻⁶		-	
1 bar	=	10 ⁵	1		1,02		0,987		750		14,505		1 μbar = 1 dyn/cm ² ¹⁾	
1 kp/cm ² = 1 at (techn. Atmosphäre) ¹⁾	=	98 100	0,981		1		0,968		735,5		14,224		1 at = 10 m WS (4 °C)	
1 atm (phys. Atmosphäre) ¹⁾	=	101 325*	1,013		1,033		1		760*		14,7		1 Torr = 1/760 atm	
1 Torr ¹⁾	=	133,32	1,333 · 10 ⁻³		1,36 · 10 ⁻³		1,316 · 10 ⁻³		1		0,01934		1 Torr = 1 mmHg (0 °C)	
1 lbf/in ²	=	6894,8	0,6895		0,0703		0,06804		51,715		1		-	

¹⁾ Einheiten nicht mehr zugelassen; Werte gerundet, * Wert genau, s. DIN 1314. Für den Druck gilt die Einheit Pascal (Pa) (DIN 1301)

Energie (Arbeit, Wärmemenge)

	J	kWh	kpm	PSh	kcal	Btu	Näheres S. DIN 1301 und DIN 1345
1 J = 1 WS = 1 Nm = 1 kg m ² /s ²	= 1	277,8 · 10 ⁻⁹	0,101972	377,5 · 10 ⁻⁹	238,8 · 10 ⁻⁶	984 · 10 ⁻⁶	1 J = 1 Nm = 10 ⁷ erg 1 eV = 1,602 · 10 ⁻¹⁹ J
1 kWh	= 3,6 · 10 ⁶	1	367 · 10 ³	1,360	859,8	3412	
1 kpm ¹	= 9,80665	2,724 · 10 ⁻⁶	1	3,704 · 10 ⁻³	2,342 · 10 ⁻³	9,294 · 10 ⁻³	
1 PSh ¹⁾	= 2,648 · 10 ⁶	0,7355	270 · 10 ³	1	632,4	2509	
1 kcal ¹⁾	= 4186,8	1,163 · 10 ⁻³	426,9	1,581 · 10 ⁻³	1	3,968	
1 Btu (British Thermal Unit)	= 1055	293 · 10 ⁻⁶	107,6	398,5 · 10 ⁻⁶	0,252	1	

¹⁾ Einheiten nicht mehr zugelassen

Leistung

	W	kW	kpm/s	PS	hp	
1 W	= 1	10 ⁻³	0,101972	1,36 · 10 ⁻³	1,341 · 10 ⁻³	1 W = 1 J/s = 10 ⁷ erg/s
1 kW	= 10 ³	1	101,975	1,36	1,341	
1 kpm/s ¹⁾	= 9,80665	9,80665 · 10 ⁻³	1	0,0133	0,0131	
1 PS ¹⁾	= 735,5	0,7355	75	1	0,986	
1 hp (horsepower)	= 745,7	0,746	76,04	1,014	1	1 hp = 550 ft lbf/s

■ 2.1 Wirtschaftliche Bedeutung der Kunststoffe

Kunststoffe haben als eigenständige Werkstoffgruppe neben Metallen und keramischen Werkstoffen eine sehr hohe technologische wie wirtschaftliche Bedeutung erlangt. Das beachtliche Wachstum dieser Werkstoffgruppe hat dazu geführt, dass Kunststoffe heute weltweit ein größeres Produktionsvolumen aufweisen als etwa Rohstahl und Aluminium (Bild 2.1).

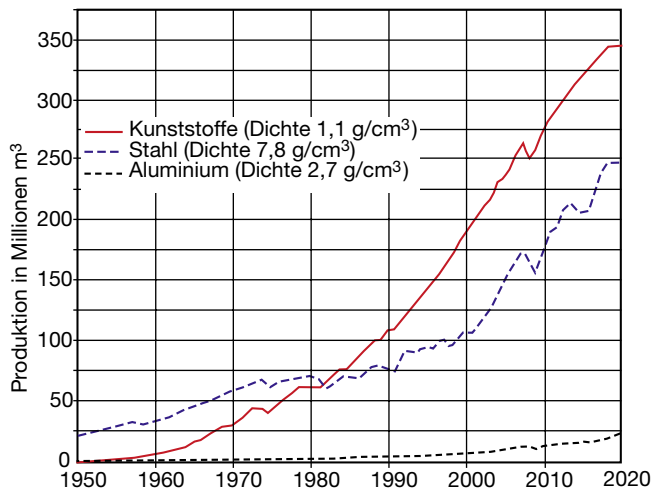


Bild 2.1 Produktionsvolumen verschiedener Werkstoffe
Quelle: Plastics Europe, World Steel Association, The International Aluminium Association

Bild 2.2 zeigt das rasante Wachstum der Kunststoffproduktion in den verschiedenen Regionen der Welt zwischen 1990 und 2020. Wir sind im 21. Jahrhundert unstrittig in der „Kunststoffzeit“ angekommen. Diese Werkstoffgruppe ist eine we-

sentliche Grundlage für die technologische Entwicklung und ein Indikator für das wirtschaftliche Wachstum einer Industriegesellschaft. Eine eindeutige Korrelation zwischen der Produktion dieses Werkstoffs und der wirtschaftlich-technologischen Leistungsfähigkeit einer Region lässt sich belegen.

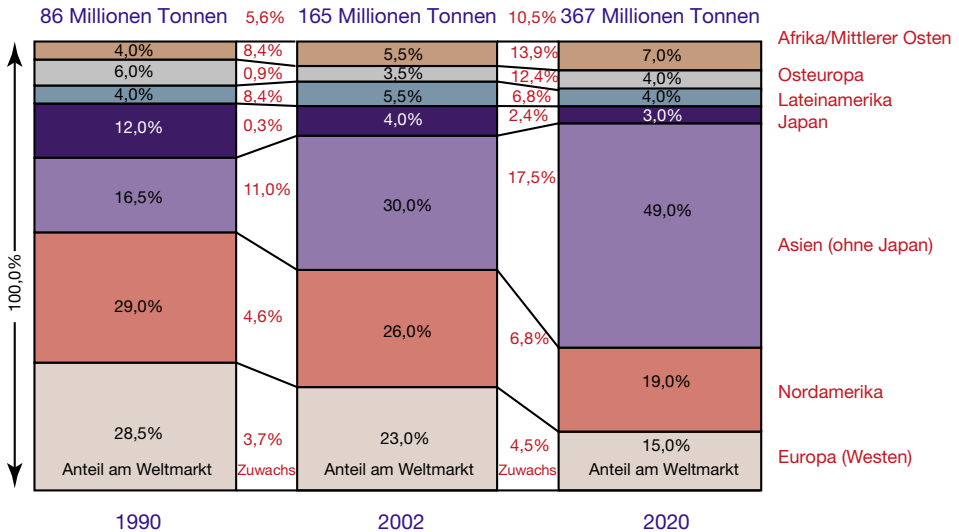


Bild 2.2 Welt-Kunststoffproduktion seit 1990
Quelle: Plastics Europe

Eine Analyse der Haupteinsatzgebiete dieser Werkstoffgruppe am Beispiel Europa im Jahr 2020 (Bild 2.3) verdeutlicht die Vielfältigkeit der Anwendungen. Der Anteil Sonstiges mit 24,2% in Bild 2.3 umfasst Anwendungen in Landwirtschaft, Möbel, Haushalt, Freizeit, Sport, Medizin und Maschinenbau. Obwohl medizinische Anwendungen stark zunehmen, ist ihr Anteil weiterhin nur etwa 1% der insgesamt verwendeten Menge an Kunststoffen. Kunststoffe haben in allen Bereichen der industriellen Produktion Einzug gefunden. Dabei sind es nicht immer die besonderen Gebrauchseigenschaften dieser Werkstoffgruppe, wie etwa das Leichtbaupotential oder die guten Isolationseigenschaften, die den Einsatz lohnenswert machen. Die wohl wichtigste Eigenschaft dieser Werkstoffgruppe sind die hierfür verfügbaren wirtschaftlichen Verarbeitungsverfahren. So erlaubt etwa das Spritzgießen die Fertigung höchst komplex geformter Bauteile mit einer Taktzeit von wenigen Sekunden bis zu einigen Minuten. Die wesentlichen Kosten für eine solche Fertigung entstehen aus den Abschreibungen der Fertigungseinrichtungen (Maschine und Werkzeuge) sowie aus den Kosten für Rohstoff und Energie. Mit steigender Stückzahl werden deshalb auch selbst aufwendige Produktionseinrichtungen höchst profitabel.

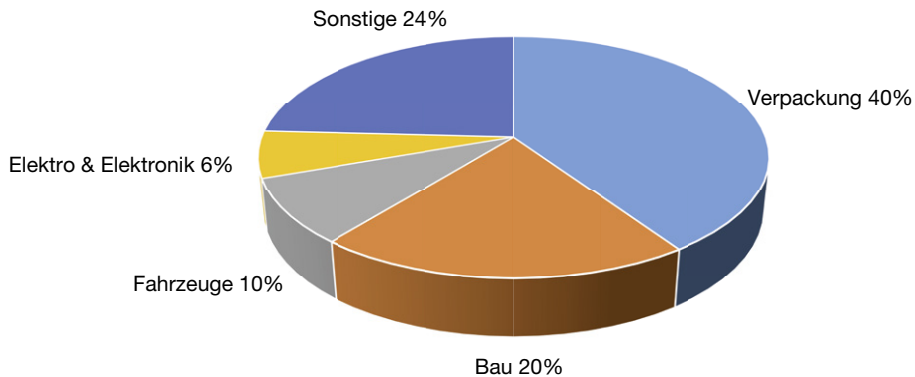


Bild 2.3 Haupteinsatzgebiete für Kunststoffe in Europa (2020)
Quelle: Plastics Europe

Betrachtet man die mit der Werkstoffgruppe Kunststoff arbeitende Industrie, so unterscheidet man sie in folgende drei Bereiche

- Kunststoff-Erzeugung,
- Kunststoff-Verarbeitung und
- Kunststoff-Maschinenbau.

Die Kunststoffindustrie trägt wesentlich zum Wohlergehen der europäischen Wirtschaft bei. Mehr als 1,6 Millionen Menschen arbeiten in fast 60 000 Unternehmen, die einen geschätzten Jahresumsatz von 360 Milliarden Euro in den 27 EU-Ländern erwirtschaften.

■ 2.2 Einordnung der Kunststoffe in das Gebiet der Werkstoffe

Kunststoffe sind organische oder halborgаниsche Werkstoffe mit hoher Molmasse (Molekulargewicht), d. h. mit sehr großen Molekülen (Makromolekülen), die das spezifische Eigenschaftsbild dieser Werkstoffe wesentlich bestimmen. Bild 2.4 gibt die Einordnung der Kunststoffe in das Gesamtwerkstoffgebiet wieder, wobei als wichtige Unterscheidungsmerkmale die chemische Struktur, die Erzeugung und die Verarbeitungs- und Gebrauchseigenschaften verwendet werden.

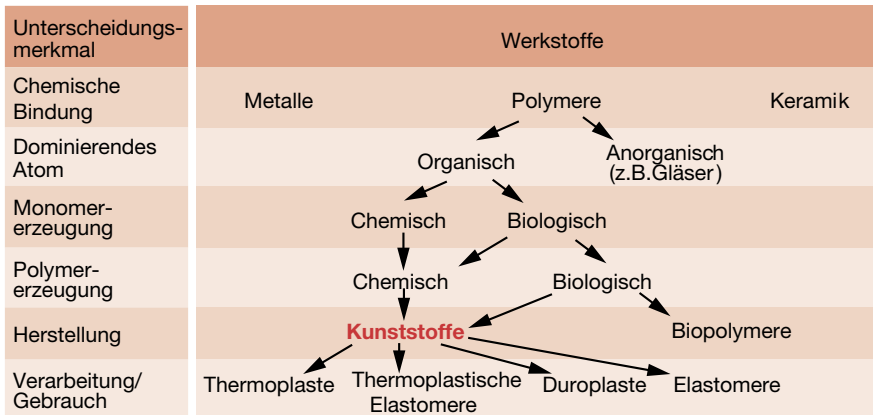


Bild 2.4 Einordnung der Kunststoffe in das Werkstoffgebiet

Im „Kunststoff-Taschenbuch“ werden die thermoplastischen Kunststoffe entsprechend ihrer Bedeutung im Schwerpunkt behandelt. Viele Ausführungen zur Werkstoffkunde der Kunststoffe gelten letztlich für alle polymeren Werkstoffe. Die begriffliche Einordnung ist in vielen Texten nicht einheitlich, so wird der Begriff Kunststoff und Polymer oftmals in gleicher Bedeutung verwendet. Nach unserem Verständnis benennt der Begriff Polymer die Gruppe aller Stoffe, die aus Makromolekülen bestehen. Der Begriff Kunststoff nimmt aus dieser Gruppe diejenigen Stoffe heraus, die chemisch synthetisiert wurden und als Werkstoffe Verwendung finden. Um einen polymeren Stoff als Werkstoff verwenden zu können, muss das Polymer mit weiteren Zusätzen (z. B. Verarbeitungshilfsmittel, Stabilisatoren, Pigmente, Füllstoffe) versetzt werden. Erst durch diesen Prozess der sog. „Aufbereitung“ entsteht aus dem Polymer ein Werkstoff – also ein Kunststoff.

Trotz dieser eindeutigen Definition gelingt auch in diesem Buch die exakte Begriffsunterscheidung zwischen Polymer und Kunststoff nicht immer. Dies hängt nicht zuletzt damit zusammen, dass selbst in der Sprache der Wissenschaft oder der Wirtschaftsstatistik die Zuordnungen nicht konsequent und eindeutig verwendet werden. So wird selbst in Werkstoffnormen häufig die Bezeichnung Polymer verwendet, obwohl eigentlich Kunststoffe behandelt werden. In solchen Fällen verbietet sich die Abänderung des Begriffs Polymer in Kunststoff, da sonst das Auffinden der Normen unmöglich wird.

Allgemein kann zum Werkstoffgebiet der Kunststoffe festgestellt werden:


- Kunststoffe werden in einer großen Typenvielfalt hergestellt, die von keiner anderen Werkstoffgruppen annähernd erreicht wird. Sie repräsentieren eine extrem große Spannweite an Eigenschaftsprofilen. Der in der Anfangszeit der Kunststoffentwicklung etwas euphorisch geprägte Slogan „**Werkstoffe nach Maß**“ ist Realität geworden. In nahezu allen Bereichen des menschlichen Lebens sind Kunststoffe als Werkstoffe oder spezielle Funktionsstoffe etabliert.

- Aufgrund ihrer komplexen chemischen und morphologischen Strukturen sowie ihrer großen Variationsbreite hinsichtlich der Zusammensetzung und stofflichen Modifizierbarkeit ergibt sich ein komplexes **Stoffverhalten**, das beim Einsatz und bei der Verarbeitung der Kunststoffe zu berücksichtigen ist. Beispiele für zu berücksichtigende Eigenschaften sind die Visko- und Entropieelastizität, das nicht-newtonsche Fließen, ein komplexes Alterungsverhalten, die Teil- und Flüssigkristallinität, orientierungs- oder modifizierungsbedingte Anisotropie, Spannungsrisbildung u. a. m. Zur umfassenden Beschreibung der Eigenschaften sind daher vielfältige Prüfverfahren erforderlich, um aussagefähige Eigenschaftswerte (Single-Point-Daten) oder Eigenschaftsfunktionen (Multi-Point-Daten) zu erhalten (s. Kapitel 3).
- Für die Aufbereitung, Ver- und Bearbeitung sowie Nachbehandlung der Kunststoffe kann eine große Anzahl verschiedenartiger **Verfahren** der Kunststofftechnik eingesetzt werden. Es dominieren die Urform- und Umformverfahren, die eine hochproduktive und energiesparende Fertigung mit sehr guter Materialausnutzung sowie geringer Anzahl von Verfahrensschritten ermöglichen. Die Stoffverformung und -umwandlung (z. B. Härten, Vulkanisieren) läuft bei der Verarbeitung u. U. gleichzeitig ab. Die Produkteigenschaften werden erheblich durch die Verfahrensbedingungen beeinflusst. Die Verfahrensoptimierung und Qualitätssicherung sollen daher in der Kunststoffverarbeitung eine angemessene Gewichtung haben (s. Kapitel 4).
- Die effiziente **Gestaltung** von Kunststoffteilen ist ohne Berücksichtigung der stofflichen Realisierbarkeit und Fertigungsverfahren nicht möglich. Dies sowie der hohe Grad der Werkstoff- und Geometriespezialisierung vieler Fertigungsverfahren zwingen dazu, Gestaltungs-, Werkstoff- und Verfahrensentcheidungen in enger Wechselbeziehung zu treffen (s. Kapitel 5).

Die Herstellkosten von Produkten aus Kunststoff werden wesentlich durch die **Werkstoffkosten** bestimmt. Zunehmend müssen neben ökonomischen Zielsetzungen auch ökologische Anforderungen bei der Werkstoffauswahl berücksichtigt werden (s. Kapitel 6). Eine zweckmäßige Werkstoffauswahl und Material sparende Konstruktion sind wirksame Möglichkeiten um eine wirtschaftliche Fertigung und ökologisch sinnvolle Kunststoffanwendung zu erzielen. Die Funktionsintegration hilft ebenfalls, Fertigungsschritte und damit Fertigungskosten einzusparen. Im gleichen Sinne wirkt sich eine recyclinggerechte Erzeugniskonstruktion aus.

In der überwiegenden Zahl finden Kunststoffe Anwendung in Systemen, in denen sie eine lasttragende, schützende oder trennende Funktion übernehmen. Dabei stehen die mechanischen Eigenschaften der Kunststoffe im Vordergrund. Wenn der verwendete Werkstoff die Tragstruktur des Bauteils wesentlich bestimmt, spricht man von einem „Strukturwerkstoff“.





In letzter Zeit sind Kunststoffe auch stärker als „Funktionswerkstoffe“ zum Einsatz gekommen. Sie zeichnen sich z. B. durch optische, elektrische oder besondere mechanische Eigenschaften aus. Zu ihnen zählen u. a. UV-Licht-härtende Harze, photoadressierbare Makromoleküle und elektrisch schaltbare Polymere. Im Allgemeinen spricht man von Funktionspolymeren (besser: Funktionskunststoffen). Im Bauteil werden die Funktionswerkstoffe lokal angeordnet, etwa schicht- oder punktförmig. Sie übernehmen eine spezielle Funktion (etwa die der Datenspeicherung). Dieser Werkstoffgruppe wird eine stark wachsende Zukunft vorhergesagt. Wegen der derzeit jedoch noch sehr speziellen Anwendungen und Eigenschaften wird diese Werkstoffgruppe nicht eingehender in diesem Taschenbuch behandelt.

Historisch bedingt werden Textilien nicht zum Kunststoffgebiet gezählt, da die Erzeugung textiler Produkte früher ausschließlich aus Naturstoffen erfolgte. Später adaptierte die Textiltechnik ihre Produktionsverfahren auch auf solche Produkte, die aus Kunststoffen hergestellt werden.

Ebenso findet sich vielfach eine historisch gewachsene Abgrenzung zwischen den thermo- und duroplastischen Kunststoffen einerseits und den Elastomeren andererseits. Spätestens mit der Entwicklung der thermoplastischen Elastomere wurde deutlich, dass diese Abgrenzung keine technische Begründung hat.

In der Kunststoffverarbeitung lassen sich drei charakteristische Phasen unterscheiden:

- Aufbereitung,
- Verarbeitung und Bearbeitung sowie
- Nachbearbeitung und Nachbehandlung.

In der Aufbereitung werden die Kunststoff-Rohstoffe oder Vorprodukte in verarbeitungsfähige Formmassen überführt, die nach der Verarbeitungsphase als eigentliche Produktwerkstoffe mit *Formstoffe* bezeichnet werden. Erfolgt während der Verarbeitung eine chemische Reaktion zur Stoffumwandlung, so sind Formmassen reaktive *Vorprodukte*, die sich von den angestrebten Werkstoffen völlig unterscheiden. Anderenfalls liegt stoffliche Identität vor. Falls erforderlich, werden in einer zweiten Verarbeitungsstufe Kunststoffhalbzeuge durch Umformen, Spanen, Schweißen u. a. zu Enderzeugnissen verarbeitet bzw. Einzelteile (Formteile, Werkstücke) und/oder Halbzeuge zu kompletten Enderzeugnissen montiert oder konfektioniert. In der Nachbehandlungsphase erfolgen, je nach Erfordernis, die Fertigbearbeitung (z. B. Entgraten), die Oberflächenbehandlung und -veredlung (z. B. Bedrucken, Beflocken, Metallisieren) und Stoffeigenschaftsänderung (z. B. Konditionieren, Tempern). Formmassen werden je nach Art, Zustand und äußerer Darbietungsform als Pulver, Grieß, Dryblend, Agglomerat, Granulat (Pellet), Prepreg, Premix, Paste (Plastisol), Lösung, Suspension, Emulsion, Latex u. a. bezeichnet.

■ 2.3 Aufbau der Kunststoffe

Die Eigenschaften von Stoffen lassen sich aus ihrer Struktur erklären. Kunststoffe besitzen die größte Strukturvielfalt aller vom Menschen genutzten Werk- und Funktionsstoffe. Für synthetische oder durch stoffliche Abwandlung hergestellte Kunststoffe gelten die gleichen Strukturierungsprinzipien wie für Biopolymere, wie z. B. Eiweiße oder Kohlenhydrate, die infolge ihrer vielfältigen Strukturvariationen zur Basis des Lebens wurden. Zur fachlichen Orientierung im Kunststoff- und Kautschukgebiet und zur Eigenschaftsbewertung sind Elementarkenntnisse der Polymerstruktur notwendig. Nachfolgend werden diese in möglichst einfacher und kurzgefasster Weise dargestellt, ohne dabei immer Anspruch auf Vollständigkeit und akademische Akkuratessse erheben zu wollen. In den weiteren Kapiteln werden diese Ausführungen durch die Angabe detaillierter Struktur-Eigenschafts-Zusammenhänge ergänzt und angewendet.

2.3.1 Chemische Struktur (Konstitution und Konfiguration der Makromoleküle)

Polymere sind organische Makromoleküle, die aus vielen sich wiederholenden Grundbausteinen bestehen. Sie werden durch verschiedene Bildungsreaktionen aus niedermolekularen Ausgangsstoffen (*Monomeren*) synthetisiert. Die überwiegende Art der chemischen Bindung bei Polymeren ist die Atombindung (kovalente Elektronenpaarbindung). Als weitere chemische Bindung kommt auch noch die Ionenbindung vor, allerdings in sehr seltenen Fällen. Die gebundenen, sog. ionischen Polymere, sind *Polyelektrolyte*, falls die Ionenkonzentration wasserlösliche Polymere bedingt. Sie werden Ionomere genannt, wenn die geringen Konzentrationen an ionisch dissoziierten Bindungen zu wasserunlöslichen Polymeren führt.

Am atomaren Aufbau von Polymeren sind hauptsächlich die Nichtmetallelemente Kohlenstoff (C), Wasserstoff (H) und Sauerstoff (O) beteiligt. Relativ häufig treten auch Stickstoff (N), Chlor (Cl), Fluor (F) und Schwefel (S) auf (*Heteroatome*). Sog. halborganische Polymere enthalten die Halbmetallelemente Silizium (Si), als Silikone oder Polysiloxane bezeichnet, und Bor (B). Andere Elementarzusammensetzungen sollen wegen ihrer sehr speziellen Bedeutung hier nicht betrachtet werden. Bereits die bisher besprochenen Strukturmerkmale erklären das Eigenschaftsbild reiner organischer Polymere:

- geringe elektrische Leitfähigkeit (elektrische Isolatoren),
- geringe Wärmeleitfähigkeit (thermische Isolatoren),
- spezifisch leichte Werkstoffe (Dichte 0,8 bis 2,2 g/cm³),
- begrenzte thermische Beständigkeit, da die Aufspaltung der Elektronenpaarbindung irreversibel ist.



Weiterhin haben die Konformation und Konfiguration der Makromoleküle großen Einfluss auf die Eigenschaften der fertigen Bauteile.

2.3.1.1 Konformation

Die Konformation beschreibt die räumliche Anordnung der drehbaren Bindungen an die Molekülkette (meist: Kohlenstoffkette), die durch die Polarität, Beweglichkeit und Regelmäßigkeit der Makromoleküle bestimmt wird. Kohlenstoffatome z. B. sind vierwertig. Das bedeutet, dass sie mit bis zu vier Substituenten verbunden werden können und sich eine tetraedrische Struktur bildet.

Das wohl bekannteste Beispiel für eine Tetraederstruktur ist Methan, CH_4 , das rechts in Bild 2.5 schematisch dargestellt ist. Es ist zu erkennen, dass die tetraedrische Anordnung der Substituenten, hier Wasserstoff, zu einem Bindungswinkel von $109,5^\circ$ führt. Dieser Winkel wird auch zwischen den Kohlenstoffatomen im Kettenmolekül beibehalten, wie im selben Bild auf der rechten Seite dargestellt. Ebenfalls zu erkennen ist, dass jede Achse der Kohlenstoffkette frei rotieren kann.

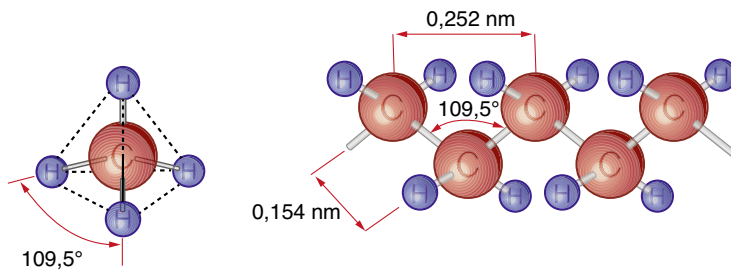


Bild 2.5 links: Schematische Darstellung von Methan (CH_4), rechts: Ausschnitt aus einem Polyethylenmolekül

2.3.1.2 Konfiguration

Die Konfiguration liefert Informationen über die Verteilung und räumliche Anordnung der Atome im Molekül. Bei Polymeren, die aus asymmetrischen Monomeren aufgebaut sind, ist es während der Polymerisierung möglich, die Seitengruppen in unterschiedlichen Richtungen zur Kette anzuordnen. Diese in bestimmten Intervallen wiederkehrende Anordnung bezeichnet man als Taktizität. Die Polymere, bei denen die Seitengruppen alle in eine Richtung zeigen, werden als isotaktisch bezeichnet und am Beispiel Polypropylen (PP) wie folgt gekennzeichnet: PP-I. Zeigen die Seitengruppen alternierend in die eine und andere Richtung, werden sie als syndiotaktisch bezeichnet (z. B. PP-S). Bei regelloser Anordnung wird von einem ataktischen Aufbau gesprochen (z. B. PP-R).

Bild 2.6 stellt die drei unterschiedlichen Taktizitäten am Beispiel von Polypropylen dar. Die Taktizität ist für die erreichbare Kristallinität des Polymers verantwortlich. Ein Polypropylen mit hohem isotaktischem Anteil z. B. kann auch einen hohen

Kristallinitätsgrad erreichen und verfügt dann über eine hohe Steifigkeit, Festigkeit und Härte.

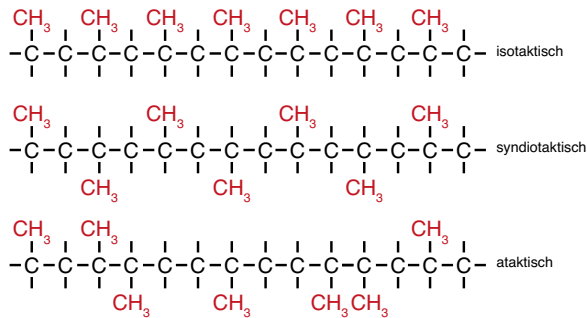


Bild 2.6 Unterschiedliche Polypropylenkonfigurationen

Bei Kunststoffen mit einer Kohlenstoff-Doppelbindung kommt es zu einer anderen geometrischen Anordnung. Die Doppelbindungen schränken die Rotation der Kohlenstoffatome um die Hauptkette ein, wodurch verschiedene, sog. Stereoisomere, entstehen können. Die Seitengruppen können auf der gleichen Seite (cis-) oder auf der gegenüberliegenden Seite (trans-) der Kette angeordnet sein, wie schematisch in Bild 2.7 dargestellt ist. Die Anordnung als cis-1,4-Polybutadien führt zu einem sehr elastischen und gummiartigen Materialverhalten, wohingegen die trans-1,4-Polybutadien-Struktur zu einem ledrigen und zähen Materialverhalten führt. Cis-1,4-Polybutadien kann daher z. B. für die Herstellung der Außenauflfläche von Autoreifen eingesetzt werden. Trans-1,4-Polybutadien wird hingegen für die Außenschale von Golfbällen verwendet. Die gleiche räumliche Anordnung kommt bei Naturkautschuken wie z. B. dem Polyisopren vor. Naturkautschuk (NR) ist chemisch ein cis-1,4-Polyisopren und ein wichtiger Gummiausgangsstoff. Es wird z. B. für den Reifenkörper eingesetzt und für die Herstellung von „Gummi“-Handschuhen oder Kondomen verwendet.

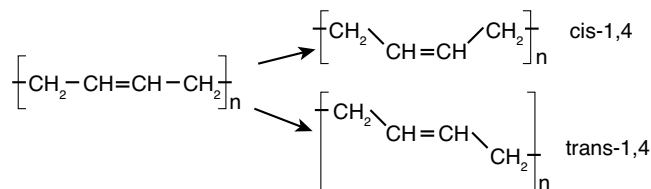


Bild 2.7 Schematische Darstellung der Strukturformeln von cis-1,4- und trans-1,4-Polybutadien-Molekülen

2.3.1.3 Konstitution

Bei chemischen Reaktionen entstehen Verzweigungen. Art und Länge der Verzweigungen werden durch die gewählte Polymereaufbaureaktion (Polymerisation) gesteuert. Die Kettenverzweigungen beeinflussen die finale Struktur, die Kristallinität und damit die Eigenschaften des Kunststoffes. Bild 2.8 stellt schematisch verschiedene molekulare Strukturen von Polyethylen (PE) gegenüber.

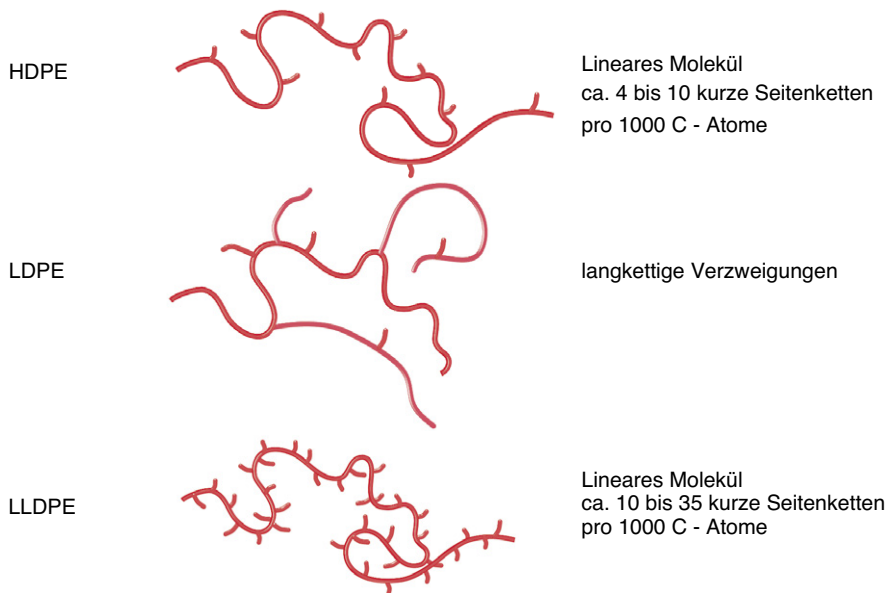


Bild 2.8 Molekulare Struktur verschiedener Polyethylene (schematisch)

Polyethylen hoher Dichte (PE-HD, high density polyethylene) weist zwischen 5 und 10 kurze Seitenketten pro 1.000 Kohlenstoffatomen auf. Polyethylen niedriger Dichte (PE-LD, low density polyethylene) besitzt die gleiche Anzahl an Seitenketten. Diese sind allerdings deutlich länger und meist noch weiter verzweigt. Polyethylen niedriger Dichte mit linearem Aufbau (PE-LLD, linear low density polyethylene) hat zwischen 10 und 35 kurze Seitenketten pro 1000 Kohlenstoffatome. Molekülketten mit weniger und auch kürzeren Seitenverzweigungen können leichter kristallisieren und haben daher auch höhere Dichten.

Die Eigenschaften von Kunststoffen sind neben der Struktur auch stark vom Molekulargewicht der Ketten abhängig. Polystyrol (PS) ist z.B. bei einem Polymerisationsgrad (Anzahl der Monomereinheiten in einem Polymer) von 1000 Atomen steif und spröde. Bei einem Polymerisationsgrad von 10 ist PS hingegen weich und klebrig. Bild 2.9 stellt die Abhängigkeit der mechanischen und rheologischen Eigenschaften vom Molekulargewicht dar. Molekülketten solcher Ausdehnung beeinflussen in erheblichem Maße die Fließfähigkeit der Kunststoffe im Schmelzezu-

stand oder in Lösung. Es gibt daher Formmassekennwerte bzw. Kennwertfunktionen, die zur praktischen Beschreibung des Fließverhaltens dienen und in Korrelation zur Molmasse stehen.

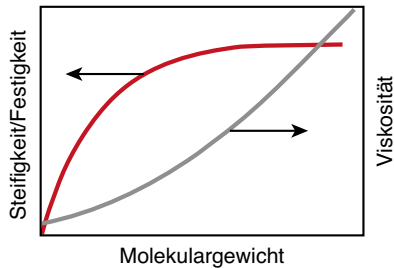


Bild 2.9

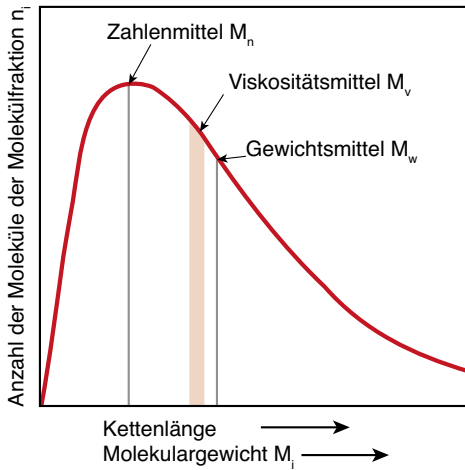
Einfluss des Molekulargewichts auf die mechanischen und rheologischen Eigenschaften

Hohe Molmassen ergeben vor allem bei schlag- oder stoßartiger Belastung größere Zerreißeigenschaften der Kunststoffe. Dabei weisen sie aber auch eine höhere Viskosität auf, die die Fließfähigkeit verringert. Zwischen der Verarbeitbarkeit (Fließverhalten) und den Anwendungseigenschaften müssen daher häufig Kompromisse getroffen werden. Außerdem kann für bestimmte Verarbeitungsprozesse (z. B. Spritzgießen) eine möglichst enge Molmassenverteilung notwendig werden, damit die Viskosität in kontrollierten Grenzen vorliegt. Dafür sind Spezialformmassen verfügbar.

Die Größe von Makromolekülen ist ein wichtiger Strukturparameter. Bei der Polymerbildungsreaktion entstehen bei den meisten synthetisch hergestellten Linearpolymeren Molekülketten mit unterschiedlicher Länge. Es handelt sich um Gemische unterschiedlich großer Molekülfractionen, d. h. um *polymolekulare* („polydisperse“) *Stoffsysteme*. Eine einheitliche Molekülgröße gibt es nicht. Die Angabe einer Molmasse (hier: relative Molmasse) ist daher immer ein statistischer Mittelwert, dessen Zahlenwert vom Verteilungsspektrum der Einzelmoleküle und der Art der Mittelwertbildung abhängt. Mit Ausnahme von einigen natürlichen Polymeren, weisen die meisten Polymere eine Molekulargewichtsverteilung, wie in Bild 2.10 dargestellt, auf. Für eine solche Verteilungsfunktion kann ein

Zahlen-, Gewichts- und Viskositätsmittelwert definiert werden. Für Eigenschaftskorrelationen ist der Gewichtsmittelwert (M_w) in der Praxis von größerer Bedeutung. Zur Beschreibung der Uneinheitlichkeit von Polymeren wird noch der Zahlenmittelwert (M_n) benötigt, der definiert ist als

$$\bar{M}_n = \frac{\sum m_i}{\sum n_i} = \frac{\sum n_i \cdot M_i}{\sum n_i}$$

**Bild 2.10**

Molekulargewichtsverteilung eines typischen Thermoplasten

wobei m_i die Gesamtmasse aller Moleküle, M_i das Molekulargewicht und n_i die Anzahl der Moleküle mit i Wiederholungseinheiten darstellt. Der Gewichtsmittelwert ist definiert als

$$\bar{M}_w = \frac{\sum n_i \cdot M_i^2}{\sum n_i \cdot M_i} = \frac{\sum m_i \cdot M_i}{\sum m_i}$$

Der Viskositätsmittelwert wird berechnet nach

$$\bar{M}_v = \left(\frac{\sum m_i \cdot M_i^{\alpha+1}}{\sum m_i} \right)^{1/\alpha}$$

wobei α eine Materialkonstante ist, die die *intrinsische Viskosität* $[\eta]$ mit dem Molekulargewicht korreliert. Dieser Zusammenhang wird manchmal auch als *Mark-Houwink Gleichung* bezeichnet und wie folgt angegeben

$$[\eta] = k \bar{M}_v^\alpha$$

Es besteht eine lineare Abhängigkeit des Molekulargewichts von der Viskosität. Diese ist bei geringem Molekulargewicht bzw. kurzen Ketten $\alpha = 1$ und folgt bei hohem Molekulargewicht aufgrund der dann vorliegenden Verschlaufungen dem Potenzgesetz (Power Law) ($\alpha = 3,4$). Wie am Beispiel in Bild 2.10 dargestellt, weisen die meisten Kunststoffe Ketten unterschiedlicher Länge auf. Sie sind also polydispers und werden wie folgt charakterisiert

$$\bar{M}_w > \bar{M}_v > \bar{M}_n$$

In wenigen Fällen bestehen Kunststoffe aber auch aus Ketten gleicher Länge (monodisperse Kunststoffe). Diese werden folgendermaßen angegeben

$$\bar{M}_w = \bar{M}_v = \bar{M}_n$$

Ein Maß für die Breite der Molekulargewichtsverteilung bzw. die Einheitlichkeit der Kettenlänge stellt die *molekulare Uneinheitlichkeit* U dar, für die gilt


$$U = \frac{\bar{M}_w}{\bar{M}_n} - 1$$

Die Breite der Molekulargewichtsverteilung hat einen signifikanten Einfluss auf die mechanischen und rheologischen Eigenschaften der Kunststoffe. Kunststofftypen mit geringer molekularer Uneinheitlichkeit weisen z.B. höhere Festigkeitswerte und bessere Fließfähigkeit auf. Tabelle 2.1 gibt einen Überblick über die molekulare Uneinheitlichkeit verschiedener Kunststoffe.

Tabelle 2.1 Molekulare Uneinheitlichkeit in Abhängigkeit von der Polymerbildungsreaktion

Polymere	$\frac{\bar{M}_w}{\bar{M}_n}$
Molekulareinheitliche Polymere	1
Polykondensate und Polyaddukte	2
Vinylpolymerisate	2 – 5
Stark verzweigte Polymere	20 – 50

Ab welcher Molmasse spricht man von Polymeren? Geht man von der Molekülgröße aus, ab der sich Molekülverschlaufungen (engl. entanglements) in Schmelzen und Lösungen nachweisen lassen, so kann die untere Grenze der Molmasse etwa mit 10^4 g/mol angegeben werden. Molekülverschlaufungen sind als temporäre physikalische Vernetzungsstellen anzusehen, die im Vergleich zu niedermolekularen Stoffen qualitativ neue Stoffeigenschaften (z.B. Entropieelastizität) ergeben. Eine obere Grenze der Polymermolmasse ist nicht festlegbar. Technisch genutzte Kunststoffe liegen zwischen 10^4 bis 10^7 , meist $5 \cdot 10^4$ bis $5 \cdot 10^5$ g/mol. Makromoleküle, die im Übergangsbereich zwischen niedermolekularen Produkten und Kunststoffen etwa bei 10^2 bis 10^4 g/mol liegen, werden als Oligomere bezeichnet. Um eine anschauliche Vorstellung von solchen Riesenmolekülen im gestreckten Zustand zu erhalten, sollte man für technisch genutzte Kunststoffe 1 mm dicke Fäden von 2 bis 200 m Länge annehmen. Spezielle Biopolymere können um mehrere Größenordnungen längere Moleküle enthalten.



Zu den Polymerbildungsreaktionen werden nachfolgend nur einige kurzgefasste Hinweise gegeben. Die Bildungsreaktionen für Makromoleküle werden durch geeignete Reaktionsbedingungen (Temperatur, Druck, Monomerkonzentration, mediale Reaktionsumgebung) sowie durch aktivierende bzw. hemmende und strukturregelnde Zusätze (Katalysatoren, Aktivatoren, Beschleuniger, Inhibitoren, Strukturregler) gesteuert. Während der *Polymerisation* verknüpfen sich Monomere durch Aufspaltung von Mehrfachbindungen oder Ringöffnungen über eine Kettenreaktion zu *Polymerisaten*. Polykondensation ist die Reaktion, bei der die Monomere durch Abspaltung von Reaktionsprodukten (z.B. Wasser) über eine Stufenreaktion zu Polykondensaten verbunden werden. In der *Polyaddition* verknüpfen sich die Monomere durch intermolekulare Wanderung eines Wasserstoffatoms ohne Abspaltung von Reaktionsprodukten über eine *Stufenreaktion* zu *Polyaddukten*. Ein Beispiel hierfür ist die Urethanreaktion. Darüber hinaus gibt es eine Reihe anderer Reaktionstypen, auf die nicht eingegangen wird. Eine eindeutige Zuordnung von Polymeren zu den Reaktionstypen ist nicht immer möglich, da die Synthese auf unterschiedliche Weise erfolgen kann. So kann z.B. die Herstellung von Polyoxymethylen (POM) nach allen oben erwähnten Reaktionstypen erfolgen. Bei anderen Polymeren, wie z.B. Polyamiden (PA 6), treten in verschiedenen Synthesestufen verschiedene Reaktionsmechanismen wie Polykondensation und Polymerisation auf.

Technisch unterscheidet man bei der Polymerisation in Abhängigkeit von der medialen Reaktionsumgebung zwischen Masse- bzw. Substanzpolymerisation, Suspensions-, Emulsions- und Lösungspolymerisation. Wenn die Polymerisationsart von Bedeutung für das Eigenschaftsbild der Polymerisate ist, erfolgt eine entsprechende Kennzeichnung. Analoges gilt für die Polykondensation und die Polyaddition.

Durch eine geeignete Reaktionsführung (z.B. Stereokatalyse; Metallocen-Katalysatoren) sind bei technischen Polymeren verschiedene Strukturen realisierbar. Daraus ist leicht ableitbar, welche Eigenschaftsvielfalt bei gleicher Elementarzusammensetzung eines Kunststoffes möglich ist. Während z.B. das weichgummiartige, amorphe, ataktische (Random-) PP-R wenig praktische Bedeutung erlangt hat, ist das härtere teilkristalline, isotaktische PP-I ein Thermoplastkunststoff mit großer Anwendungsbreite. Sog. schlagzähe Polypropylene sind u. U. Mischstrukturen zwischen diesen Extremen.

In der technischen Synthese ist 100%iges PP-I beispielsweise kaum herstellbar. Der ataktische Anteil kann als heptanlösliche Phase bestimmt und in Form des Isotaxie-Index als Formmassekennwert angegeben werden.

2.3.1.4 Kunststoff-Hauptgruppen

Im Folgenden werden die Hauptgruppen der Kunststoffe vorgestellt, die heutzutage eingesetzt werden. In Kapitel 6 werden viele dieser Kunststoffe bezüglich ihrer Eigenschaften und Verarbeitungsmöglichkeiten ausführlicher behandelt.

Nennenswert sind auch lineare Homopolymerisate, die entweder aus ungesättigten Monomeren direkt polymerisiert werden bzw. durch polymeranaloge Stoffumwandlung entstehen. Für letztere Polymere stehen Polyvinylalkohol und die Polyvinylacetale, die aus Polyvinylacetat chemisch abgewandelt werden. Kombiniert man die Monomere, so ergeben sich eine entsprechende Vielfalt von Copolymeren.

Im Sprachgebrauch werden diese Kunststoffe auch nach anderen Merkmalen eingeordnet. So werden z. B. alle Kunststoffe mit olefinischen Ausgangsstoffen als Polyolefine (PO) zusammengefasst: PE, PP, PB, PMP und PIB.

Sind Heteroatome (z. B. Sauerstoff) in der Hauptkette enthalten, ergeben sich Polyacetale und Polyether. Werden zusätzlich „sperrige“ Aromatenbausteine eingefügt (Polyarylether, Polyaryletherketone), so wird die Wärmeformbeständigkeit dieser Polymere durch das steifere Makromolekül erheblich erhöht.

In der Anfangszeit der Kunststoffentwicklung wurden durch eine stoffliche Abwandlung von Naturprodukten, wie z. B. Cellulose, technisch interessante Kunststoffe gewonnen, die teilweise noch heute oder wieder eingesetzt werden. Das steife Cellulosemolekül erschwert eine thermoplastische Verarbeitung, sodass diese Produkte mit Weichmachern oder anderen Polymeren abgemischt werden. Die starke Polarität dieser Verbindungen bedingt u. a. eine große Wasseraufnahme, ja sogar Wasserlöslichkeit (z. B. Carboxymethylcellulosen (CMC) als Tapetenkleister).

Polyamide sind lineare Polykondensate, die u. a. als Konstruktionswerkstoffe, Chemiefaser- und Folienstoffe weite Verbreitung finden. Einige dieser Polymere sind infolge Wasserstoffbrückenbindungen und aromatischer Anteile besonders wärmeformbeständig. Sie haben allerdings auch eine vergleichsweise große Wasseraufnahme. Durch Variation der unpolaren Methylenanteile $[-CH_2-]$ sind nahezu alle Übergangsstufen zwischen Polyolefinen und Polyamiden mit hoher Amidgruppenkonzentration $[-NHCO-]$ möglich. Eine Vielzahl von Copolyamiden ergänzen die Eigenschaftspalette.

Lineare Polyester sind ebenfalls Polykondensate, die technisch aber nur als aromatenhaltige Polyarylester größere Bedeutung erlangten. Spezielle Copolyester haben so steife Molekülsegmente (Mesogene), dass sie auch im flüssigen Zustand anisotrop geordnet sind und damit sog. flüssigkristalline, eigenverstärkte Polymere (LCP) darstellen.

Die größte Molekülsteifigkeit wird durch die chemische Struktur der Polyimide verwirklicht. Einige Typen (z. B. PPI, PBI, PBMI) sind nicht mehr thermoplastisch verarbeitbar. Sie besitzen sehr hohe Wärmealterungs- und Wärmeformbeständigkeiten und sind meist Leiter- oder Halbleiter-Polymere.



Eine technisch wichtige Gruppe von thermoplastischen Kunststoffen sind die Polyarylethersulfone und Polyarylsulfide. Als Besonderheit der chemischen Struktur ist hierbei die Kombination von aromatischen und schwefelhaltigen Kettenbausteinen zu nennen, die diesen Kunststoffen ausgewogene Eigenschaften als leistungsfähige Konstruktionskunststoffe verleiht.

Alle bisher beschriebenen Kunststoffe sind Linearpolymere, die entweder im plastischen Zustand durch Ur- und Umformverfahren oder im Falle der Unschmelzbarkeit aus Lösungen, Dispersionen, Pulver u. a. durch Beschichtungs- und Sintertechniken verarbeitet werden. Polymere mit Doppelbindungen im Makromolekül können nachträglich zu Elastomeren chemisch vernetzt werden (z. B. durch eine Schwefelvulkanisation). Es sind also typische Vertreter der Kautschuke. Polycycloolefine gewinnen neuerdings als besonders wärmebeständige Thermoplaste an Bedeutung.

Sollen nach der Verarbeitung vernetzte Kunststoffe (Duroplaste) oder Elastomerwerkstoffe (Gummi) vorliegen, müssen lösliche bzw. schmelzbare Ausgangsstoffe als Formmassen verwendet werden, die aus weitgehend linearen bzw. teilvernetzten Makromolekülen oder aus niedermolekularen Verbindungen bestehen. Der eigentliche Werkstoff entsteht erst bei der Verarbeitung durch Vernetzungsreaktionen (*Härtung, Vulkanisation*). In diesen Ausgangsstoffen müssen tri- oder höherfunktionelle Moleküle vorhanden sein, die zu einer Vernetzungsreaktion befähigt sind. Der Kunststoffverarbeiter muss in diesem Fall neben der Formgebung auch die chemische Aufbaureaktion im gewünschten Sinne steuern. Sofern nicht direkt von niedermolekularen, reaktiven Verbindungen ausgegangen werden kann, muss auf „vorgefertigte“ Makromoleküle (*Prepolymere*) zurückgegriffen werden. Diese sind bezüglich der Molmasse meist als Oligomere einzuordnen. Als Vernetzungsreaktionen kommen alle Polymerreaktionstypen in Frage, die bereits genannt wurden. Die wichtigsten vernetzten Kunststoffe sind die Phenoplaste (PF), die Aminoplaste (UF, MF), ungesättigten Polyesterharze (UP), Epoxidharze (EP), Polyurethandüromere und -elastomere (PUR) sowie Silikonharze und -elastomere. Durch chemische Abwandlungen verkörpern sie jeweils eine breite Typenvielfalt. Einzelheiten zu den vernetzten Kunststoffen sind Kapitel 6 zu entnehmen.

2.3.2 Morphologische Struktur (Konformation und Aggregation der Makromoleküle)

Nachdem die chemische Zusammensetzung und die Molekülarchitektur erklärt wurde, wird im Folgenden die Frage nach dem Bewegungs- und Ordnungszustand der Makromoleküle bei veränderbaren äußeren Bedingungen, wie z. B. Temperaturänderung und Deformation durch Kräfte, beantwortet.

Amorphen Strukturen fehlt eine durchgängige Fernordnung der Moleküle. Die Moleküle nehmen darin den energieärmsten Zustand eines statistischen Durchdringungsknäuels an. Dadurch ist nur im Bereich bis ca. 1 nm eine gewisse Nahordnung vorhanden, die von Zwischenmolekülkräften (ZMK) und Molekülgestalt abhängt. Werden bei höheren Temperaturen oder durch Anlagerung von Lösungsmittelmolekülen (Solvatation) die ZMK aufgehoben, d. h. die mikrobrownsche Bewegung freigesetzt, ist dieser amorphe Knäuelzustand für alle Polymere zutreffend, unabhängig von deren spezieller Struktur im Festzustand. In Schmelze und Lösung gilt dieses vorstehend beschriebene Strukturmodell als experimentell gesichert.

Der amorphe Festzustand wird wegen weitgehender Übereinstimmung mit dem Zustand erstarrter Gläser auch als *Glaszustand* bezeichnet. Aufgrund ihrer ungeordneten, manchmal auch als wirr bezeichneten Struktur, ist die Größenordnung der größten geordneten Struktur im Bereich einer Kohlenstoffbindung. Diese Größenordnung ist aber deutlich kleiner als die Wellenlänge des sichtbaren Lichts. Daher sind amorphe Thermoplaste in der Regel transparent. Bild 2.11 stellt den Schubmodul G' (ein Maß für die lineare elastische Verformung eines Kunststoffes) als Funktion der Temperatur für Polystyrol dar. Polystyrol ist einer der meist verwendeten amorphen Kunststoffe. Es sind zwei große Bereiche zu erkennen: im Bereich niedriger Temperaturen bzw. im Glaszustand ist der Modul relativ konstant, mit steigender Temperatur fällt der Modul signifikant ab. Bei hohen Temperaturen ist der Modul vernachlässigbar klein, das Material ist weich genug, um zu fließen. Obwohl es bei amorphen Thermoplasten keinen schlagartigen Übergang zwischen „fest“ und „flüssig“ gibt, wird die Temperatur, die die beiden Bereiche trennt, als *Glasübergangsbereich* oder *Glasübergangstemperatur* T_g bezeichnet. Bei dem in Bild 2.11 dargestellten Polystyrol liegt die Glasübergangstemperatur bei ca. 110 °C. Bei Temperaturen unterhalb T_g verhält sich das Material wie ein viskoelastischer Festkörper. Dieser Bereich ist im Bild als *energieelastischer Bereich* bezeichnet. Sobald das Material über T_g erwärmt wird, erreicht es den sogenannten *entropieelastischen Bereich*. In diesem Zustand kann das Material bereits gut verformt werden, wie es z. B. beim Thermoformprozess getan wird. Um jedoch fließen zu können, muss die Temperatur über die *Fließtemperatur* T_s hinaus erhöht werden. Erst in diesem Zustand verhält sich das Material wie eine viskoelastische Flüssigkeit. Man spricht auch davon, dass die Fließtemperatur den Punkt charakterisiert, ab dem die viskosen Anteile der Verformung, der Verlustmodul, die elastischen Anteile, den Speichermodul, überwiegen. Für amorphe Thermoplaste ist dieser Bereich typischerweise 50 K oberhalb der Glasübergangstemperatur. Die genaue Festlegung der *Glas- oder Einfriertemperatur* sowie der *Fließtemperatur* ist Sache der Prüfmethodekonvention und hängt außerdem stark von der Art und Dauer der Beanspruchung bei der Messung ab. Die „Antwortreaktion“ der Moleküle erfolgt zeitlich verzögert zur „Lasterregung“ der Prüfmethode. So werden bei dynamisch-mechanischen Prüfungen mit hohen Lastwechselfrequenzen deutlich höhere Glastemperaturen (dynamische Glastemperatur $T_{g \text{ dyn}}$) gemessen als bei



kalorimetrischen oder dilatometrischen (also Ausdehnungs-)Prüfungen mit sehr langsamer Temperaturänderung (statische Glastemperatur $T_{g, stat}$). Je nach Kunststoffart und Höhe der Glastemperatur sind Differenzen von bis zu 50 K zu erwarten. Man kann anschaulich auch so argumentieren, dass sich Kunststoffe umso härter bzw. steifer verhalten, je schneller der Beanspruchungszyklus ist.

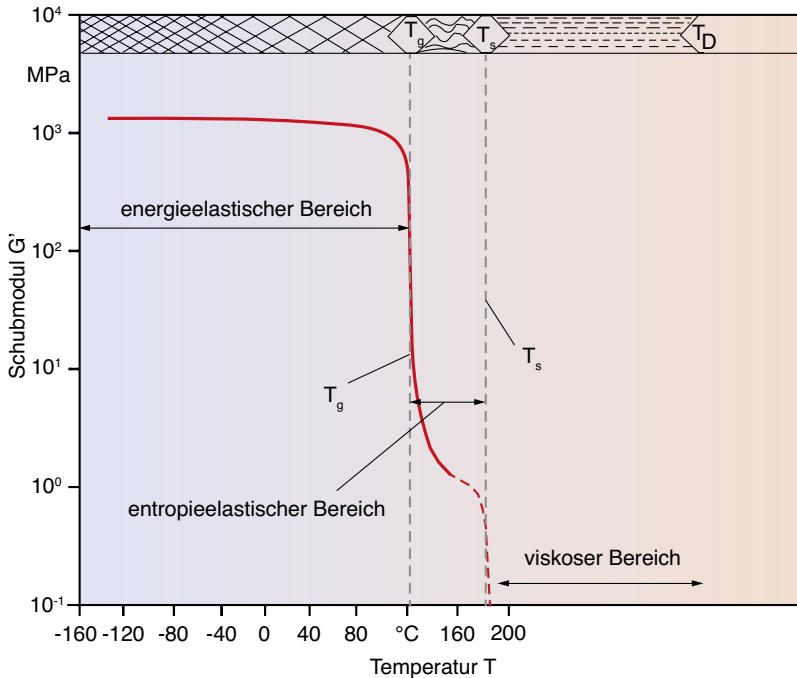


Bild 2.11 Abhängigkeit des Schubmoduls von der Temperatur bei PS

Werden Kunststoffe einer mechanischen Belastung ausgesetzt, so ist eine zeitabhängige Verformungszunahme bei vorgegebener Spannung (*Kriechen, Retardation*) bzw. ein zeitabhängiger Spannungsabbau nach erfolgter Verformung (*Relaxation*) zu beobachten. Dieses Verhalten, auch als *Viskoelastizität* bezeichnet, lässt sich auf die gleichzeitige Wirkung von drei qualitativ unterschiedlichen Deformationsmechanismen zurückführen:

- energieelastische (auch: spontanelastische) Verformung,
- entropieelastische (auch: gummielastische) Verformung und
- plastische (auch: viskose) Verformung.

Das unterschiedliche mechanische Verhalten von Kunststoffen und Gummi wird lediglich durch die graduell verschiedenen Verformungsanteile im jeweiligen thermischen Zustand bestimmt. Die verschiedenen molekularen Bewegungsmechanismen erlauben extrem unterschiedliche Verformungen. Sie reichen von ca. 0,1 % für

energieelastische Verformung über nahezu 100 % für gummielastische Verformung bis zu ca. $10^4\%$ für plastische Schmelzen. Das *nicht-newtonsche Fließen* (z. B. Strukturviskosität) von Kunststoffschmelzen oder -lösungen ist gleichfalls dieser Deformationsmechanik geschuldet und wird in Kapitel 3 näher beschrieben.

Am Beispiel der amorphen Knäuelstruktur können wesentliche Struktur-Eigenchafts-Beziehungen der Kunststoffe erklärt werden. Sind die Makromoleküle sehr gleichmäßig aufgebaut und unterstützen ihre Konfiguration sowie die Stärke der ZMK eine enge Annäherung der Moleküle, so tritt *Kristallitbildung* ein, da die Ordnungsvergrößerung zumindest partiell zu einem höheren Energiegewinn führt als die Entropievergrößerung.

Die Kristallisation von organischen Polymeren ist ein derart komplexes Strukturbildungsphänomen, dass hier nur eine stark vereinfachte Darstellung möglich ist. Die Kristallbildung wird, wie auch bei niedermolekularen bzw. atomaren Stoffen, durch die Teilschritte der Keimbildung und des Kristallwachstums bestimmt. Die Vielfalt der Makromolekülkonformationen sowie die Tendenz der Entropievergrößerung (Molekülknäuelung) lassen eine vollständige Kristallisation bei technischen Abläufen (Herstellung, Verarbeitung) nicht zu. Kunststoffe sind daher in der Regel *teilkristallin*. Ihre morphologische Struktur ist durch ein Gemenge von amorphen und kristallinen Phasen gekennzeichnet, deren Grenzen auf molekularer Ebene nicht eindeutig bestimmbar sind. Ein und dasselbe Makromolekül kann in einzelnen Abschnitten sowohl der amorphen als auch der kristallinen Phase angehören. Im Regelfall aggregieren die lamellaren oder mizellaren Kristallite zu *kristallinen Überstrukturen* (Bild 2.12), deren wichtigste Vertreter die *Sphärolithe* sind. Der kristalline Anteil wird quantitativ durch den *Kristallisationsgrad* angegeben, der bei besonders leicht kristallisierenden Kunststoffen 60 bis 80 % betragen kann. Unter Laborbedingungen werden auch höhere Werte bis hin zu *polymeren Einkristallen* erreicht.

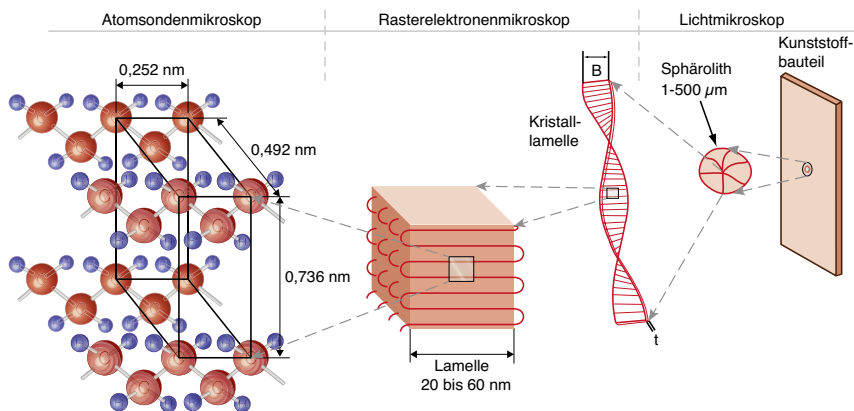


Bild 2.12 Morphologie eines teilkristallinen Thermoplasten

Bild 2.13 zeigt den dynamischen Schubmodul als Funktion der Temperatur für ein PE-HD, den meist verwendeten teilkristallinen Kunststoff. Diese Kurve stellt das Ergebnis der Messung bei einer Frequenz dar. Es gibt zwei klare Übergänge: einen bei ca. $-110\text{ }^{\circ}\text{C}$, der *Glasübergangstemperatur*, und einen bei $140\text{ }^{\circ}\text{C}$, der Schmelztemperatur. Oberhalb der *Schmelztemperatur* ist der Schubmodul vernachlässigbar gering und das Material kann fließen. Sobald die Temperatur wieder abnimmt, beginnen sich kristalline Strukturen auszubilden. Zwischen der Schmelz- und Glasübergangstemperatur verhält sich das Material überwiegend wie ein zäher Festkörper. Wenn die Temperatur bis unter die Glasübergangstemperatur sinkt, erstarren auch die amorphen Bereiche zwischen den kristallinen Strukturen. Resultat ist ein steifes und meist auch sprödes Materialverhalten.

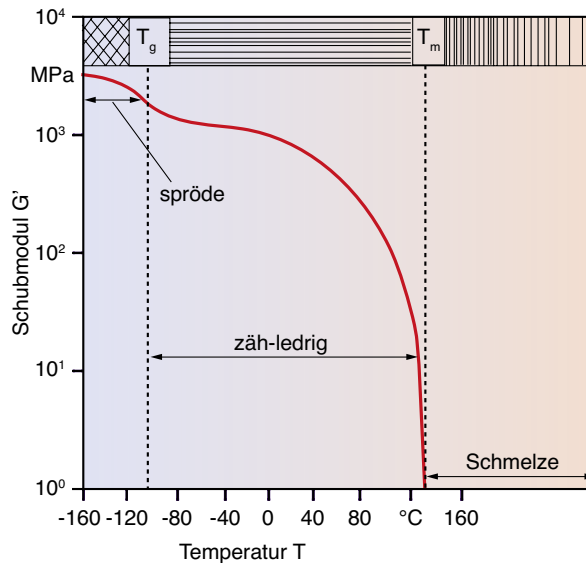


Bild 2.13 Abhängigkeit des Schubmoduls von der Temperatur bei PE-HD

Bei der Verarbeitung der Kunststoffe entstehen durch inhomogene Kristallkeimbildung oder unterschiedliche Abkühlungsgeschwindigkeiten im Stoff lokal unterschiedliche kristalline Strukturen (wie etwa feinsphärolitische Randschichten bei Spritzgießbauteilen). Eine entsprechende Eigenschaftsanisotropie ist die Folge. Die Besonderheiten der morphologischen Struktur teilkristalliner Kunststoffe waren schon immer Anlass, diese im Sinne gewünschter Eigenschaften zu beeinflussen:

- Durch Reckung bzw. Scherung der Makromoleküle können infolge molekularer Umlagerung bzw. Neubildung orientierte kristalline Strukturen erzeugt werden. Dies bewirkt eine erhebliche Steigerung von Festigkeit, Steifigkeit u.a. in der gewünschten Richtung. Solche kristallinen Überstrukturen sind u.a. Fibrillen-

und Schaschlik/Shish-Kebab-Strukturen, die in Bild 2.14 wiedergegeben sind. In der Chemiefaserindustrie und Kunststofftechnik sind viele solcher Verfahrensvarianten bekannt, so z. B. Fadenreckung, biaxiale Folienverstretchung, Spritzgieß-, Extrusions- und Walzpressrecken. Ergebnisse dieser Manipulationen sind anisotrope Strukturen mit unidirektionaler oder orthogonaler Orientierung.

- Durch bewusste Steuerung der Erstarrungsbedingungen und/oder Zugabe feinverteilter Nukleierungsmittel als Keimbildner wird eine möglichst homogene und feinkörnige Kristallitstruktur angestrebt, die z. B. für verschleißbeanspruchte und maßhaltige Kunststoffprodukte sehr vorteilhaft ist.

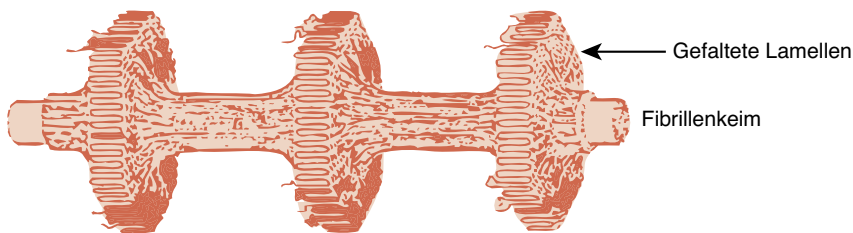


Bild 2.14 Shish-Kebab-Struktur

Einige Polymere sind aufgrund ihrer Molekülkonfiguration bei üblichen Erstarrungsbedingungen nicht zur Kristallisation befähigt. Durch Reckung ist infolge der Parallellagerung und Annäherung der Molekülsegmente aber eine teilweise Kristallisation möglich, die als *Dehnungskristallisation* bezeichnet wird. Diese Art der Strukturbildung setzt ein gewisses Maß an mikrobrownscher Molekülbeweglichkeit voraus, da sich Kristallite nur durch molekulare Umlagerungen während des Dehnungsvorgangs bilden können. Häufig zu beobachten ist die Dehnungskristallisation bei Kautschuken (z. B. NR, IR, IIR, CR). Die damit verbundene Härtezunahme wird in der Elastomertechnik allerdings nicht immer geschätzt.

Kristalline Strukturen verkörpern den höchsten molekularen Ordnungszustand von Polymeren im Sinne dichtester Molekülaggregationen mit entsprechend verstärkten ZMK. Aber auch sie sind unvollkommene Gebilde und Ergebnis eines „eingefrorenen“ Kristallisationsungleichgewichts, so dass sie bei Erwärmung in einem unterschiedlich breiten Temperaturintervall und nicht an einem Schmelzpunkt aufschmelzen. Das Aufschmelzen erfordert zusätzliche, latente Wärmeenergie als *Schmelzwärme*. Beim schnellen Erstarren setzt wegen der *Unterkühlbarkeit* der Schmelzen die Kristallisation bei Erstarrungstemperaturen ein, die 20 bis 40 K unterhalb der Schmelzendtemperaturen liegen können. Nukleierungsmittel als Keimbildner können diese Differenz verringern. Kristalline Phasen erhöhen Härte, Steifigkeit und Verschleißfestigkeit der Kunststoffe und verringern Permeation, Diffusion, Löslichkeit und Quellbarkeit. In vieler Hinsicht ergeben sich ähnliche Einflüsse auf die Kunststoffeigenschaften wie bei einer chemischen Vernetzung. Es

ist daher zulässig, die kristallinen Strukturen als *physikalische Vernetzungsstellen* anzusehen, die thermisch reversibel sind.

Nach den bisherigen Strukturbetrachtungen ist es vorstellbar, dass extrem steife Makromoleküle, wie z. B. Leiterpolymere (Doppelstrangpolymere mit einer leiterähnlichen Struktur), weder zu einer amorphen Knäuelstruktur, noch zu einer Einordnung im Kristallgitter befähigt sind. Die Moleküle sind vergleichbar mit wenig flexiblen Stäbchen (*Mesogene*), die nur einen geringen Freiheitsgrad der mikrobrownschen Beweglichkeit besitzen. Falls eine makrobrownsche Bewegung möglich ist, ordnen sie sich zu anisotropen Parallelstrukturen (Modell: Baumstämme im Fluss), die als *Mesophasen* bezeichnet werden. Zwischen den Mesogenen herrschen zwar ZMK, deren Stärke aber nicht annähernd mit denen echter Kristallgitterstrukturen vergleichbar ist. Es liegt also ein kristallähnlicher Ordnungsgrad mit geringem Energieniveau vor. Realisiert man einen flüssigkeitsähnlichen Zustand, so bleibt die Mesophasenstruktur meist erhalten. Polymere mit derartigen Strukturen werden als *flüssigkristalline Polymere* (liquid crystal polymers, LCP) bezeichnet. Da jede noch so geringe makrobrownsche Molekülbewegung die Mesogene in Reck- oder Strömungsrichtung unidirektional orientiert und damit hochbelastbare anisotrope Strukturen erzeugt, spricht man auch von *eigenverstärkenden Polymeren*. Die Mesophasenstruktur als Zwischenglied amorpher und kristalliner Struktur wird als *mesomorph* bezeichnet.

Durchgängige Leiterpolymere (z. B. Aramide) sind durch Erwärmung nicht plastifizierbar. Der flüssigkeitsähnliche Zustand ist nur in Lösung (*lyotrope LCP*) erreichbar. Sollen wärmeplastifizierbare (*thermotrope*) LCP erzeugt werden, so kann dies durch Kombination von Leiterstrukturen mit flexiblen Molekülsegmenten, den sogenannten *Spacern*, erreicht werden. Bei diesen Polymeren beschränkt sich die Mesophasenstruktur auf die Mesogene. Die unterschiedliche Anordnung der Mesogene im Festzustand und in der Schmelze führt zu unterschiedlichen Mesophasenstrukturen (z. B. nematisch, smektisch), die sich nach Ausrichtung und Packungssymmetrie unterscheiden. Bei bestimmten Temperaturen erfolgen Mesophasenumwandlungen, ohne die mesomorphe (anisotrope) Grundstruktur der LCP prinzipiell zu verändern. Wenn keine thermische Zersetzung auftritt, wird oberhalb einer bestimmten Temperatur (*Klärtemperatur*) die Mesophasenstruktur in eine ungeordnete isotrope Struktur überführt. Alle diese Umwandlungen erfordern nur geringe Umwandlungswärmen. Für die Spacersegmente der Makromoleküle sind alle für flexible Polymere zutreffenden Morphologien (amorph, kristallin) möglich.

2.3.3 Kunststoffklassen

Die Einteilung der Kunststoffe in Thermoplaste, Duroplaste, Elastomere und thermoplastische Elastomere nach Bild 2.4 beruht auf einer qualitativen Unterscheidung der Molekülbeweglichkeit bei Raumtemperatur, wobei in der Namensgebung der *Thermoplaste* die Möglichkeit, nicht aber die zwingende Notwendigkeit eines thermoplastischen Zustands erfasst ist. In Bild 2.15 wird schematisch die Zuordnung der in Bild 2.4 benannten Kunststoffklassen auf Basis ihrer makro- und mikrobrownschen Molekülbeweglichkeit gezeigt.

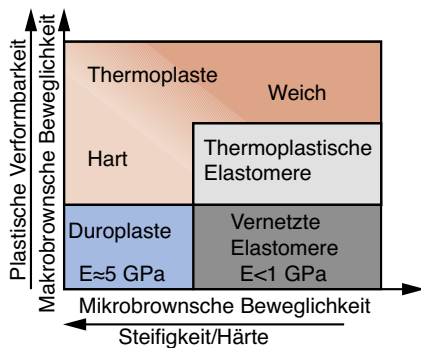


Bild 2.15

Einordnung der Kunststoffe nach der Molekülbeweglichkeit bei Raumtemperatur

Es handelt sich dabei immer um Endprodukt-Werkstoffe, also nicht um Formmassen und Vorprodukte. Duroplaste und vernetzende Elastomere haben aufgrund ihrer kovalenten (chemischen) Vernetzung eine geringere makrobrownsche Beweglichkeit (freie Bewegung ganzer Molekülketten: Abgleiten von Ketten voneinander, Lösen und Bilden von Verschlaufungen) als Thermoplaste oder thermoplastische Elastomere. Duroplaste (Duromere) und Gummi sind mithin nicht oder infolge unvollkommener Netzbildung nur gering plastisch verformbar.

Die Abgrenzung zwischen Duroplasten und Gummi ist eine Frage der praxisüblichen Konvention, die sich in unterschiedlicher Härte bzw. Steifigkeit ausdrückt und dadurch unmittelbar mit der mikrobrownschen Molekülbeweglichkeit (Rotation und Translationsbewegungen um die Bindungsachse von einzelnen Atomen oder kleinen Kettenabschnitten) zusammenhängt. Es ist der Bereich, in dem Hartgummi, flexible EP-, UP-, PUR-X-, SI-X-Harze u. a. liegen.

Nach diesem Einteilungsprinzip sind Thermoplaste (Plastomere) und thermoplastische Elastomere unvernetzte Kunststoffe, d. h., sie bestehen aus linearen oder verzweigten Makromolekülen. Nur mit dieser Struktur ist die Option eines thermoplastischen Zustands höchster makrobrownscher Molekülbeweglichkeit gegeben. Seit etwa 1990 haben Kunststoffe zunehmend an Bedeutung gewonnen, die gummiähnliche Eigenschaften mit rationeller thermoplastischer Verarbeitbarkeit verknüpfen. Für diese Kunststoffklasse wurde u. a. der Begriff *thermoplastische Elasto-*

mere geprägt. Die derzeitigen Bemühungen zur Nomenklatur dieser Kunststoffe sind zum einen ein erneuter Beweis, wie schwer man sich in der Kunststofftechnik schon immer mit Bezeichnungssystemen getan hat, zum anderen dafür, dass es aus strukturphysikalischer Sicht ein sehr komplexes Problem ist. Im Grunde soll mit diesen Kunststoffen ein thermoplastisch verarbeitbarer, idealer Gummiwerkstoff geschaffen werden. Diese Forderung ist gleichbedeutend damit, dass möglichst große mikrobrownsche Molekülbeweglichkeit mit ausreichend gummielastischer (entropieelastischer) Verformbarkeit und geringer makrobrownscher Beweglichkeit (geringer plastischer Verformung) zu kombinieren sind. Man benötigt also ein weitmaschig vernetztes Polymer mit geringen ZMK, dessen Vernetzungsstellen thermisch reversibel sind. Solche *physikalischen Vernetzungsstellen* können auf verschiedenste Weise verwirklicht werden.

Durch Molekülverschlaufungen trägt jeder Thermoplast ein gewisses „Gummipotential“ in sich. In der Praxis wurden weiches Polyvinylchlorid (PVC-P, PVC plastiziert), Polyisobutylen (PIB) und andere weichelastische Thermoplaste als gummiähnliche Ersatzstoffe in vielen Bereichen eingesetzt, bevor sie durch moderne Typen thermoplastischer Elastomere substituiert wurden.

Aus Bild 2.15 wird aber auch klar, dass der ideale Gummi erst erreicht ist, wenn die physikalischen Vernetzungen annähernd die Bindungsstärke kovalenter Vernetzung erreichen. Vielleicht bietet die Vervollkommnung ionischer Strukturen einen aussichtsreichen Ansatzpunkt.

Zu den Strukturbetrachtungen sollen abschließend die wichtigsten Kunststoffklassen (außer LCP) nochmals im Zusammenhang kurz charakterisiert werden:

- **Amorphe Thermoplaste.** Lineare und verzweigte Makromoleküle mit amorpher Struktur. Thermoplastisch erweichend (z.B. PMMA-Spritzgießmassen) bzw. bei sehr großer Molmasse nur thermoelastisch erweichend (z.B. PMMA-Gusshalbzug). Prinzipiell löslich in geeigneten Lösungsmitteln. Bei geringen ZMK (z.B. unpolares PIB) oder deren Verminderung durch Solvataion (z.B. Weichmacherzusatz, PVC-P) und flexiblen Makromolekülen ist $T_g < RT$. Diese Kunststoffe sind weichelastisch bei RT und zunehmend gummiähnlich bei größerer Molmasse. Stärkere ZMK und steifere Moleküle ergeben $T_g > RT$, d. h. bei RT hartelastische Kunststoffe. In extremen Fällen (z.B. Leiterpolymere) ist Erweichung vor der thermischen Zersetzung nicht möglich.
- **Teilkristalline Thermoplaste.** Grundmerkmale der Moleküle wie bei amorphen Thermoplasten. Zusätzliche Teilkristallinität bewirkt größere Härte und verringerte Löslichkeit. Für den Fall $T_g < RT$ bewirkt die kristalline Phase hornähnliches, zähhartes Verhalten bei RT. Thermoplastischer Zustand nur bei Überschreitung von T_m möglich. Liegt T_m sehr viel über T_g , so ist nach dem Aufschmelzen der Kristallite sofort ein thermoplastischer Zustand erreicht (z.B. Polyamide). Ist dies nicht der Fall bzw. liegt eine sehr große Molmasse vor (z.B. hochmolekulare Polyamide), so tritt ein thermoelastischer Zustand auf. Extreme Verringerung

der Molekülbeweglichkeit kann sowohl das thermoelastische Erweichen (z. B. wasserfreie Cellulose mit $T_g = 225\text{ °C}$) als auch den thermoplastischen Zustand (z. B. PE-UHMW, ultra high molecular weight PE) vor der Zersetzung völlig verhindern. Die Löslichkeit solcher Stoffe bei RT ist u. U. erheblich eingeschränkt, bzw. für sie ist noch kein Lösungsmittel bekannt (z. B. Polytetrafluorethylen, PTFE).

- *Thermoplastische Elastomere*. Durch amorphe oder teilkristalline Hartsegmente (Domänen) bzw. durch Ionencluster thermisch reversibel vernetzte Makromoleküle mit geringer Vernetzungsdichte sowie Blends aus Thermoplasten mit hohen Anteilen vernetzter bzw. unvernetzter Elastomerphase. Thermoplastisch erweichende und lösliche, elastomerähnliche Kunststoffe.
- *Vernetzte Elastomere (Gummi)*. Thermisch irreversibel (kovalent) vernetzte Makromoleküle mit überwiegend amorpher Struktur und meist geringer Vernetzungsdichte (geringe Härte). Thermoplastische Erweichung nicht möglich. Prinzipiell unlöslich, aber in geeigneten Medien u. U. stark quellbar. Ausgeprägte Gummielastizität (Entropieelastizität) ohne plastische Verformung im Temperatureinsatzbereich. Dehnungskristallisation relativ häufig.
- *Duroplaste*. Thermisch irreversibel (kovalent) vernetzte Makromoleküle mit amorpher Struktur und großer Vernetzungsdichte. Thermoelastische Erweichung je nach Höhe der zwischenmolekularen Kräfte und Vernetzungsdichte unterschiedlich ausgeprägt. Bei sehr enger Vernetzung ohne praktische Bedeutung. Prinzipiell unlöslich, aber je nach Vernetzung mehr oder weniger quellbar in geeigneten Medien.

■ 2.4 Einfluss der Fertigung auf die inneren Eigenschaften

Die Fertigung beeinflusst durch variable Prozessparameter und die weiteren Randbedingungen wie Bauteilgeometrie, Werkstoffeigenschaften, etc. die Eigenschaften des Kunststoffs im Formteil (Bild 2.16). Da hier vielfältige Wirkungen oft sehr komplexer Art beobachtet werden können, hat es sich in der Kunststofftechnik eingebürgert, die „inneren Eigenschaften“ zu definieren. Die inneren Eigenschaften sind Merkmale zur Beschreibung des Zustands eines Kunststoffs, wie z. B. seiner Morphologie. Die wichtigsten inneren Eigenschaften sind:

- Orientierungen,
- Eigenspannungen,
- Kristallisation (Kristallisationsparameter),
- molekularer Aufbau (mittlere Molmasse, Molmassenverteilung),
- Änderung der Zuschlagsstoffe (z. B. Stabilisatoranteil, Faserlänge).





Bild 2.16 Einflussfaktoren auf die inneren Eigenschaften

Die inneren Eigenschaften beschreiben den Zustand des Kunststoffs im Bauteil. Sie bestimmen die Änderungen der Gebrauchseigenschaften. Durch ihre Kenntnis kann der Einfluss der Verarbeitung auf die Bauteileigenschaften bewertet werden.

2.4.1 Eigenspannungen

Eigenspannungen resultieren unmittelbar aus der Druck- und Temperaturführung beim Erstarrungsprozess (Bild 2.17). Eigenspannungen wachsen an bei:

- heterogener Temperaturverteilung im Bauteil,
- schnellen Abkühlgeschwindigkeiten,
- hohen Wärmeausdehnungskoeffizienten,
- hohem E-Modul des Werkstoffs.

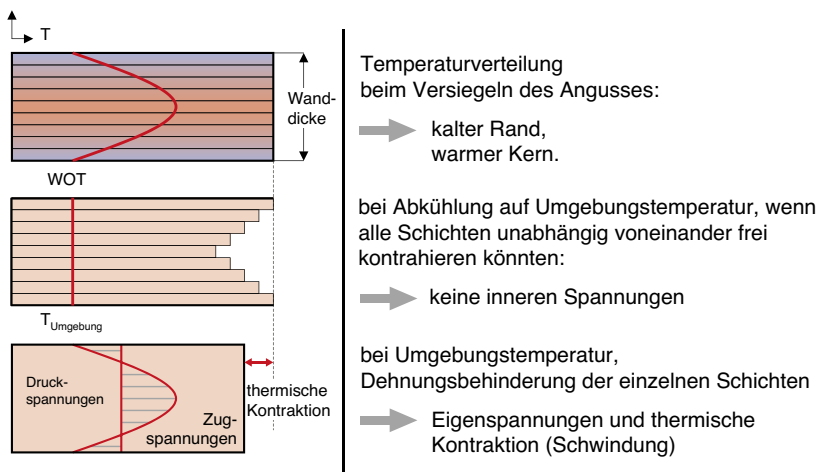


Bild 2.17 Schichtmodell: Entstehung von Abkühlspannungen

Eigenspannungen stellen eine mechanische Beanspruchung dar, die wie äußere Spannungen auf das Bauteil wirken und bei der Festigkeitsanalyse berücksichtigt werden müssen (in erster Näherung durch Abminderung des Festigkeitskennwertes).

Bei Werkstoffverbunden bewirken unterschiedliche Wärmeausdehnungskoeffizienten ebenfalls Eigenspannungen in Abhängigkeit vom durchlaufenen Temperaturintervall (Bimetalleffekt). Durch Tempern (Erhitzen über einen längeren Zeitraum) kurz unterhalb der Schmelztemperatur und anschließendes langsames Abkühlen können Eigenspannungen abgebaut werden. Bei spannungsrissempfindlichen Werkstoffen können Eigenspannungen schon bei geringen äußeren Lasten oder bei Einwirkung rissauslösender Medien Risse im Bauteil erzeugen.

Der Einfluss der Fertigung und insbesondere der Eigenspannungen auf die Bauteileigenschaften zeigt sich insbesondere in den Merkmalen Schwindung und Verzug, die im Detail in Abschnitt 3.2.2.2 und 3.2.2.3 erläutert werden.

2.4.2 Molekül-Orientierung

In einer nicht bewegten Kunststoffschmelze liegen die Molekülketten in einem regellosen, verknäuelten Zustand vor (Ausnahme: LCP). Bei bewegten Schmelzen können sich die Moleküle in einer Vorzugsrichtung ausrichten und es findet eine Molekülorientierung statt. Schematisch ist dies in Bild 2.18 dargestellt. Aus einem kreisförmigen Schmelzelement wird im Fließprozess ein orientiertes Element. Der Orientierung liegen zwei unterschiedliche Prozesse zugrunde:

- Lokale Dehnung eines Schmelzelements, z. B. wenn sich ein Fließkanal verengt oder eine Fließfront ähnlich der Aufweitung der Hülle eines Luftballons beim Aufblasen dehnt. Ebenso beim Blasformen oder Warmformen (Tiefziehen).
- Scherung benachbarter Schmelzeschichten bei Strömungen mit einem Geschwindigkeitsprofil beim Spritzgießen oder Extrudieren, wenn die Schmelze an der Werkzeugwand haftet.

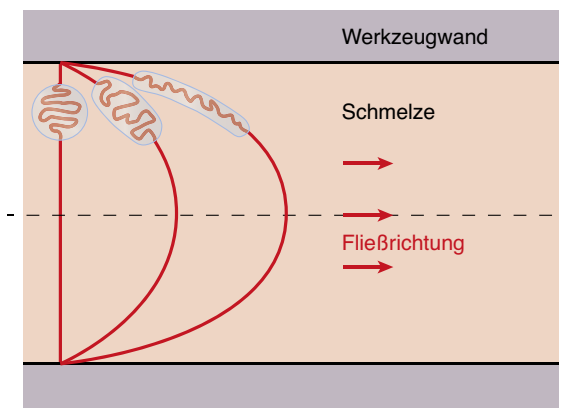



Bild 2.18
Entstehung der Molekülorientierung



Der beim Spritzgießen erzeugte Orientierungszustand ist besonders bei komplex gestalteten Formteilen nur mit einiger Erfahrung und Hilfe von Rechenprogrammen abzuschätzen. Infolge der Dehnung der Fließfront und deren schneller Erkaltung beim Anlegen an die Werkzeugwand, liegt in der Formteiloberfläche in der Regel eine dünne, sehr hoch biaxial orientierte Schicht vor. Unterhalb der Oberfläche wird durch das dort vorliegende hohe Schergefälle bei der Werkzeugfüllung eine im Wesentlichen in Fließrichtung orientierte Schicht entstehen. In der Mitte der Wanddicke ist das Schergefälle und damit die Orientierung gering.

Infolge der Brownschen Bewegung der Moleküle bilden sich Orientierungen in der Schmelze sehr schnell zurück, sie relaxieren. Bei den Bedingungen des Spritzgießens werden hierzu nur wenige Sekunden benötigt. Da der Abkühlvorgang im Werkzeug jedoch auch sehr schnell erfolgt, wird ein Teil der Orientierung eingefroren. Das Maß der eingefrorenen Orientierungen hängt demnach von der Masstemperatur, der Größe der Dehn- und Scherströmung, dem Erstarrungsverhalten der Schmelze, der Werkzeugwand-Temperatur und der Wanddicke des Formteils ab. Hohe Einspritzgeschwindigkeiten beim Spritzgießen bedeuten zwar eine hohe Orientierung der Schmelze, aber auch eine längere Verweilzeit der Schmelze bei höheren Temperaturen und damit eine stärkere Relaxation, so dass die eingefrorene Orientierung geringer sein kann als bei langsamer Einspritzgeschwindigkeit. Niedrige Masstemperaturen, kalte Werkzeuge und geringe Wanddicken führen zu hohen Orientierungen.

Im Bereich der Raumtemperatur relaxieren die eingefrorenen Orientierungen praktisch nicht mehr. Wird das Formteil jedoch bei erhöhten Temperaturen und längerfristig eingesetzt, kann es zur Relaxation und der damit immer verbundenen Schrumpfung oder Verwerfung kommen, falls die Verformung nicht wie im Spritzgießwerkzeug durch Formzwang verhindert wird, s. Abschnitt 3.2.2.2 und 3.2.2.3.

Eine Orientierung bedeutet Anisotropie der Eigenschaften: In Orientierungsrichtung liegt eine höhere Steifigkeit und Festigkeit, Wärmedehnung und Verarbeitungsschwindigkeit vor.

Bei transparenten Werkstoffen kann man Orientierungen mit Hilfe der Polarisationsoptik qualitativ nachweisen, da orientierte Bereiche doppelbrechend sind, s. Abschnitt 3.6. Die röntgenographische Methode eignet sich besonders zur quantitativen Untersuchung von teilkristallinen Kunststoffen. Eine weitere quantitative Bestimmung kann über die Messung des Schrumpfes erfolgen. Hierbei werden die ganzen Formteile, Ausschnitte oder Dünnschnitte bei erhöhter Temperatur gelagert, so dass die Orientierungen relaxieren und zu Deformationen führen. Die Verformung ist ein Maß für die eingefrorenen Orientierungen.

2.4.3 Kristallisationsverhalten

Bei teilkristallinen Thermoplasten werden die inneren Eigenschaften zusätzlich durch die Kristallinität bestimmt. Neben dem Kristallisationsgrad ist auch die Überstruktur (z.B. Sphärolithdurchmesser) ein Merkmal für die Kristallinität.

- Je höher dieser Kristallisationsgrad ist, umso steifer und fester, aber auch spröder ist das Formteil. Die Dichte des Kunststoffes korreliert unmittelbar mit dem Kristallisationsgrad. Geringe Kristallisation oder sehr feinkristalline Strukturen ergeben opake bis transparente Teile. Die Kristallinität wird außer durch die chemische Struktur des Kunststoffes durch die Art der Nukleierung, den Verarbeitungsprozess und eine eventuelle Wärme-Nachbehandlung festgelegt. Kalte Werkzeuge und hohe Abkühlgeschwindigkeiten führen zu einem geringen Kristallisationsgrad und feinkristallinen Strukturen. Ein Beispiel hierfür sind Getränkeflaschen aus PET. Sie werden so schnell abgekühlt, dass das ansonsten weiße Material transparent erstarrt. Außerdem trifft dies vor allem für geringe Wanddicken und die Oberflächen von Formteilen zu. Lange Verweilzeiten der Schmelze bei hohen Temperaturen ergeben hohe Kristallisationsgrade und grobere Strukturen. Diese treten vor allem im Inneren von dickwandigen Formteilen auf. Werden Bauteile im Spritzgießprozess gefertigt, wird die Wärme über die Bauteiloberfläche an das Werkzeug abgeführt. Aufgrund der niedrigen Wärmeleitfähigkeit des Kunststoffes entsteht im Bauteil ein Temperaturgradient, der in einem schichttiefenabhängigen Kristallisationsgrad resultiert, Bild 2.19.
- Bei längerem Einsatz der Formteile, besonders bei höheren Temperaturen, tritt eine Nachkristallisation ein. Hiermit ist eine Volumenabnahme verbunden, die zum Verzug oder zu Passungsschwierigkeiten führen kann. Durch eine Wärmenachbehandlung, also eine Lagerung über längere Zeit bei erhöhten Temperaturen, kann die Nachschwindung vorweggenommen werden. Die Sphärolithe können beim Verarbeitungsprozess - ähnlich wie die Makromoleküle - durch Scherung ausgerichtet werden und sind dann die Ursache für ein anisotropes Verhalten der Formteile. Je geordneter die Makromoleküle in der Schmelze liegen (Orientierung), umso besser können die Makromoleküle kristallisieren (scherungsinduzierte Kristallisation).

Der Prozentsatz des kristallinen Anteils an der Gesamtmasse kann röntgenographisch, thermoanalytisch mittels dynamischer Differenzkalorimetrie (DSC) oder mit Hilfe der Kernresonanzspektroskopie bestimmt werden. Da zwischen dem Kristallisationsgrad und der Dichte ein direkter Zusammenhang besteht, kann beim Vorliegen einer Eichkurve aus der Dichte auf die Kristallinität geschlossen werden.



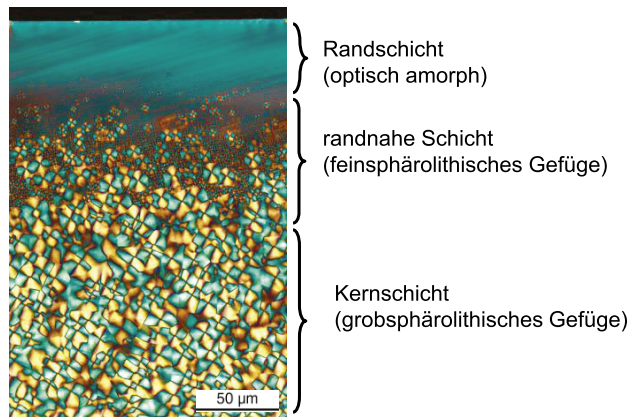


Bild 2.19 Gefüge in einem Spritzgießformteil aus PA 66¹

■ 2.5 Stoffliche Modifizierung von Kunststoffen

Unter stofflicher Modifizierung wird im Folgenden die Blendherstellung aus Homopolymeren sowie die Zugabe von Füll- und Zusatzstoffen (Additive) für unterschiedlichste Zweckbestimmungen verstanden. Dieses Gebiet ist vielschichtig und hier nur eine kurze Übersichtsdarstellung möglich. Weitere Einzelheiten zu diesem Problemkreis finden sich in den folgenden Kapiteln.

2.5.1 Copolymere und Polymermischungen (Blends)

Copolymere sind Kunststoffe mit zwei oder mehr Monomertypen innerhalb einer Kette. Ein Copolymer mit zwei unterschiedlichen Monomertypen wird als *Bipolymer bezeichnet*. Besteht es aus drei unterschiedlichen Monomereinheiten spricht man von einem *Terpolymer*. Abhängig von der Anordnung der unterschiedlichen Monomere in der Kette kann nach vier Anordnungen unterschieden werden in *statistische*, alternierende, *Block-* und *Pfropf-Copolymere*. Ein typisches Beispiel für ein Copolymer ist Ethylen-Propylen. Obwohl beide Monomere für sich den teilkristallinen Thermoplasten zugeordnet werden können, zeigt der Blend bei Mischungsverhältnissen zwischen 35/65 und 65/35 keine Schmelztemperatur. Das Material ist ein Elastomer. Diese sog. EPDM-Materialien (Ethylen-Propylen-Dien-

¹ C. M. Dallner, M. O. Kobes, R. W. Feulner, E. Schmachtenberg: Influence of the morphology on the tribological behaviour of assembly injection moulded Microdrives, PPS-23, 27 – 31 Mai 2007, Salvador, Brazil (2007)

Kautschuke) finden aufgrund ihrer guten Witterungsbeständigkeit immer mehr Verwendung in der Industrie. Im Gegensatz dazu weisen alle Ethlen-Propylen-Blockcopolymerer unabhängig vom Mischungsverhältnis eine Schmelztemperatur auf.

Polymermischungen (*Polymerblends, Polymerlegierungen, Blends*) werden durch Mischen oder Blenden von zwei oder mehr Kunststoffen hergestellt mit dem Ziel, ein Material mit verbesserten Eigenschaften gegenüber den einzelnen Komponenten zu erhalten. Zu den gängigen Polymerblends gehören PP-PC (Polycarbonat), PVC-ABS (Acrylnitril-Butadien-Styrol), und PE-PTFE. Aus energetischen Gründen ist die Mischbarkeit von Polymeren im Regelfall sehr eingeschränkt und homogene Mischungen auf molekularer Ebene (homogene Blends) die Ausnahme.

Die Bildung eines morphologischen Mehrphasensystems (heterogene Blends) ist nicht von vornherein ungünstig, da viele nützliche Eigenschaften der Ausgangskomponenten erhalten bleiben können. Voraussetzung für qualitativ hochwertige Blends ist eine stabile Blendmorphologie. Dispergierte Phase und Matrix müssen in gleichmäßiger Verteilung bei guter Phasenhäsion vorliegen. Nach dem Stand der Misch- und Zerteiltechnik sind u.U. „Phasentröpfchen“ unterhalb der Wellenlänge des sichtbaren Lichts erreichbar (transparente Blends). Zur Verbesserung der Mischbarkeit und Adhäsion werden verschiedene Methoden und Techniken praktiziert:

- Abstimmung von Ausgangsverträglichkeiten,
- Abstimmung der quantitativen Zusammensetzung und der Aufbereitungstemperaturführung,
- Chemische Modifizierung durch Ionenbindungen, dynamische Phasenvernetzung, partielle Pfropfcopolymerisation u. a., wobei die Reaktionen bei der Blendherstellung ablaufen können,
- Zugabe von Verträglichkeitsmachern (Kompatibilizer) und
- Bildung von Durchdringungsnetzwerken (interpenetrating Networks, IPN) bei vernetzten Polymerstrukturen, die besonders günstige mechanische Eigenschaften ergeben.

Anfangs war die Blendherstellung überwiegend auf Verbesserung der Verarbeitbarkeit und Schlagzähmodifizierung, insbesondere für das Tieftemperaturgebiet, ausgerichtet. Dafür wurden vorzugsweise Kautschuke als Blendkomponente eingesetzt (elastomermodifizierte Kunststoffe). Heute werden Polymerblends für das ganze Feld der Eigenschaftverbesserung genutzt, wie z.B. die Erhöhung der Wärmeformbeständigkeit, die Verringerung der Spannungsrissbildung, die Lackierbarkeit, die Galvanisierbarkeit und die Brennbarkeitsverminderung. Die Nutzung der Blendtechnologie für thermoplastische Elastomere sei besonders betont. Durch verstärktes Stoffrecycling hat die Blendtechnik einen weiteren Impuls erfahren.



Index

Symbole

3D-Druck (3DP) 332

A

AA/BB-Polymere 584

Abbau

– Kinetik 420

– mechanisch 420

– photochemisch 420

– thermisch 420

– thermisch-oxidativ 420

Abbrandgeschwindigkeit 167

Abkanten 362

Abkantschweißen 362

Abkühlgeschwindigkeit 121

Abkühlzeit 115, 259

Ablegeverfahren 317

Abminderungsbeiwerte 96

Abminderungsfaktoren 471

AB-Polymere 584

Absorption 139

ABS-Polymerisate 529

Abtragen 414

Acetatseide 682

Acrylamid 505

Acrylat-Elastomere 569

Acrylat-Kautschuk 736

Acrylnitril 563

Acrylsäure 506, 708

– Ester 495, 563

Adapterwerkzeug 243

Additionsvernetzung 741

Additive 753

Additive Fertigungsverfahren 322

Adhesive Forces 74

Adiabatischer Extruder 225

Adipinsäure 585, 605, 695, 724

Advani-Tucker-Orientierungstensor 436

Aktivkohle-Adsorptions-Verfahren 158

Aldehyde 721

Algen 157

Aliphatische Polyester 638

Aliphatisches Polyketon 690

Alkydharze 722

Alkylsulfonsäureester des Phenols 544

Allylderivate 721

Allylester 711

Alterungsschutzmittel 669

Alterungsverhalten 108

Aluminiumhydroxid 669, 758, 771, 775

Aluminiumnitrit 771

Aluminiumoxidhydrat 669

Aluminiumsilikat 771

Aluminiumtrihydrat 775

Amine 667, 710

Aminocaprinsäure 585

Aminoplaste 720

– Formstoffe 702ff.

Ammoniumpolyphosphate 669

Amorph 29

– Struktur 29

– Thermoplaste 36

Amorphe Polyamide 589

Anbacken 76

Anforderungsliste 425f.

Anguss

– Art 252

– Buchse 253

– Markierung 280

Anionische Polymerisation 288

- Anisotropie 40, 446
 Anschnitt 278
 Antibakterielle Mittel 769
 Antibeschlag-Schichten 411
 Antiblockmittel 753
 Antihaft-Schichten 411
 Antioxidantien 755
 Antistatika 410, 669, 757
 Aramid
 – Faser 794
 Aramide 610, 658
 Arbeitsablauf 452
 Arbeitsaufnahme-Vermögen 87
 Aromatische Polyether 636
 Aromatische Polyimide 644
 Aromatische Polysulfide 630
 Aromatische Polysulfone 630
 Asbest 783
 Aspektverhältnis 302, 770
 Ataktisch 511
 Atmosphären-Plasmabehandlung 402
 Atmosphärische Einflüsse 156
 Atombindung 19
 Aufbereiten 197
 – härtpbarer Formmassen 217
 Aufbereitung 16ff.
 Auftriebverfahren 100
 Ausdehnungskoeffizient 116, 187
 Aushärteverlauf 183
 Ausschwitzen 158
 Automated Fiber Placement (AFP) 318
 Automated Tape Layup 318
 Azelainsäure 724
 Azodicarbonsäurediamid 767
 Azopigmente 762
 Azovernetzung 494
- B**
- Backing-Folie 274
 Bakterien 157
 Bändchen 241
 Bänder 798
 Barfilex-Verfahren 241
 Barriere
 – Schnecke 223
 Barriereigenschaften 642
 Batch-Verfahren 291
 Baudichtungsbahnen 244
 Baumwolle 680, 789
 Bauteilversuch 474
 Baymetec-Verfahren 274
 Beanspruchungsgrenzwert 471
 Bedrucken 405
 Beflocken 407
 Belichtung 156
 Beschichten 244, 404
 Beschleuniger 766
 Beschriften 405
 Beständigkeit gegen Organismen 157
 Beton 794
 Bewitterung 156
 Bewitterungsbeständigkeit 156
 Biaxiale Verstreckung 237
 Biegefestigkeit 83
 Biegeformen 362
 Biegeschwivngungsversuch 182
 Biegespannung 82
 Biegeversuche 87
 Bi-Komponentenfaser 348
 Bindegarn 798
 Bindenaht 96, 238, 269, 282
 Bioabbaubare Kunststoffe 678
 Biopolymere 25, 678
 Biozide 669
 Bisdien-Harze 727
 Bis(hydroxymethyl)cyclohexan 695
 Bis(isocyanatomethyl)norboman 666
 Bisphenol A 611, 616f., 650, 720
 – Glycidylether 708
 Blähgraphit 779
 Blasfolienwerkzeug 242
 Blenden 197
 Blends 42f.
 Blister-Verfahren 366
 Blockcopolyamide 608
 Block-Copolymere 695
 Blockschaumstoffe 671ff.
 Blow Molding Foam Technologie 250
 Borsten 798
 Brandgase 166
 Brandverhalten 165
 Brechungsindex 142, 411
 Breitschlitzwerkzeug 236
 Brennbarkeit 166
 Brennier-Verfahren 405
 Brombutylkautschuk 733
 Bromverbindungen 669

Bruchdehnung 80
Bruchspannung 80
Bubble-Verfahren 366
Bulk Molding Compounds 303, 717
Butadien-Kautschuk 732
Butandiol 697, 705
Buten-1 495, 502
Buton-Harze 727
Butylacrylat 505
Butyl-Kautschuk 733

C

Calciniertes Kaolin 776
Calciumcarbonat 771 ff.
– präzipitiert 773
Calciumsulfat 771
CAMPUS 47f.
Caprolactam 585
Carbon Black 773
Carbonfaser 794
Carbon Nanotubes 779
Carbonsäureanhydride 649
Carbonsäuren 628
Carboxylgruppe 660
Carboxymethylcellulose 685
Carreau-Modell 61
Casein-Formaldehyd 686
Casein-Kunststoffe 686
Catalloy-Katalysator 511
Celluloid 684
Cellulose 680
– Acetobutyrat 684
– Derivate 680
– Hydrat 685
– Nitrat 684
– Propionat 683
Celuka-Verfahren 240
Cenospheres 777
Ceramics Injection Molding 264
Charpy-Kerbschlagzähigkeit 88
Chemical Vapor Deposition (CVD) 411
Chemiefaser 781
Chemische Beständigkeit 153
Chemisches Schäumen 285
Chemische Struktur 19
Chillroll-Verfahren 237
Chlorbutylkautschuk 733
Chlorierter PE-Kautschuk 736

Chloropren-Kautschuk 732
Chlorsulfonierter PE-Kautschuk 736
Chromatographie 192
Chromophore 762
CIE-Lab-Normfarbtafel 141
CIE-Lab-System 141
Clarifier 768
Coating 765
Coextrusion 242
Coextrusionsblasformen 249
Color-variable Pigmente 764
Comparative Tracking Index 133
Compoundieren 201
Compression Resin Transfer Molding 312
Computersimulation 450
Continuous Pressure Laminates 320
COP 506
Copolyamide 592, 605, 695
Copolyester 695
Copolyester-TPE 692
Copolymere 505
Copolymerisate 525
Coronabehandlung 401
Coronaentladungen 401
Couette Rheometer 57
Coulomb'sche Reibungszahlenmodell 169
Counter-Valve-Verfahren 280
Crash-Simulation 85
Crazes 154
Cross-Modell 61
Cycloolefin-Copolymere 505
Cyclopentan 768

D

Dachbahnen 244
Dampfbremsen 165
Dämpfungswerte 101
Daopex-Verfahren 494
Datenbank 48
Datenblocksystem 484, 538
Dauerschwingversuch 94, 97
Deformationsmechanismen 30
Dehnungskristallisation 33
Dehnaviskosität 60
Dehydrokondensation 742
Dekorative Schichtpressplatten 319
Dekorieren 405
Depolymerisation 421

- Di-2-ethylhexyl-Adipinat 683
 - Di-2-ethylhexyl-Phthalat 682f.
 - Diallylphthalat-Harze 711, 727
 - Diamine 592, 644
 - Dianhydride 644
 - Dibutyl 683
 - Acetat 683
 - Phthalat 682f.
 - Dicarbonsäure 592, 610, 617, 695, 724
 - Ester 695
 - Dichte 99
 - Gradientensäule 100
 - Profil 100
 - Verlauf 286
 - Dichteprofil 100
 - Dichteverteilung 76
 - Dicyclopentadien 506, 517, 705, 726
 - Dielektrischer Verlustfaktor 134, 183
 - Dielektrische Spektroskopie 183
 - Dielektrisches Verhalten 134
 - Dielektrizitätskonstante 183
 - Dielektrizitätszahl 134
 - Diethyl-Phthalat 682
 - Differential-Kalorimetrie 184
 - Differential-Thermoanalyse 184
 - Diffusion
 - Koeffizienten 148
 - Sperrschichten 411
 - Digital Light Processing (DLP) 328
 - Diglycidylether 725
 - Dihydroxydiphenylsulfid 617
 - Dihydroxypolytetrahydrofuran 695
 - Diisocyanate 649, 666, 697
 - Diisopropyl-Phthalat 682
 - Dilatometrie 187
 - Dimensionierungskennwerte 468f.
 - Dimensionierungsrechnung 468, 473
 - Dimethyl-2,6-Naphthalendicarboxylat 629
 - Dimethylglykol-Phthalat 682
 - Dimethyl-Phthalat 682
 - Diocetylacetat 683
 - Diocetylsebazat 683
 - Diolen 610
 - Diphenol-Terephthalat 658
 - Diphenylcarbonat 611
 - Direct Ink Writing (DIW) 329
 - Direktcompoundierung 257
 - Dispensen 746
 - Dispergieren 198
 - Dispergierung 225
 - Dispersionsgebiete 89
 - Dispersionsknetter 205
 - DMA 181
 - Doppelbandpressen 320
 - Doppelbrechung 142
 - Doppelkonusmischer 200
 - Doppelschneckenextruder 226
 - Doppelschnecken-Knetmischer 205
 - Doppeltransportbänder 298
 - Dosiervolumen 257
 - Dosisleistung 157
 - Dough Molding Compounds 717
 - Drähte 798
 - Dreiplattenmaschine 256
 - Dreiplatten-Werkzeug 283
 - Dreizonenschnecke 221
 - Druckbehälter 794
 - Drucksintern 556
 - Druckspannung 84
 - Druckversuch 84
 - DSC 184
 - DTA 184
 - Dünnwandtechnik 515
 - Durchgangswiderstand 125
 - Durchlässigkeit 158
 - Durchschlagfestigkeit 129
 - Durchstoßversuch 87
 - Duroplaste 37, 698
 - Duroplastische Polyimide 649
 - Duroplastspritzgießen 260
 - Düse 253
 - Düsenziehverfahren 784
 - Dynamisches Langzeitverhalten 94
 - Dynamisch-mechanische Analyse 101
 - Dynamisch-mechanische Spektroskopie 181
- E**
- ECTFE 560
 - Effektpigment 763
 - Eigenschaftsanisotropie 32
 - Eigenspannung 37ff., 412, 416
 - Eigenverstärkende Polymeren 34
 - Eindruckversuch 84
 - Einfallstellen 69, 252
 - Einlegeteile 273
 - Einreiben 410
 - Einschnecken-Extruder 220

- Einschnürverhalten 86
Einspritzgeschwindigkeit 438
Elastizitätsmodul 79, 97, 181
Elastomere 727
Elastomerspritzgießen 262
Electro-Magnetic-Interference 758
Electrostatic Discharge 136
Elektrische Durchschlagfestigkeit 129
Elektrische Füllstoffe 780
Elektrische Kennwerte 51
Elektrisches Verhalten 123
Elektrische Zeitstandfestigkeit 132
Elektrolumineszenz 689
Elektrolytische Korrosion 134
Elektromagnetische Abschirmung 128, 781
Elektromagnetische Compatibility 128
Elektromagnetische Interferenz 128
Elektromagnetische Verträglichkeit 128
Elektronenstrahlvernetzung 494
Elektrospinnprozess 349
Elektrostatische Aufladung 123, 402, 416
Elektrostatisches Pulver-Sprühen 405
Elektrostatisches Verhalten 136
Elektrostatisches Wirbelsintern 405
Elektrotechnik 123
Emulgatoren 668
Emulsions-Polymerisation 535
Energieabsorption 95
Energieelastischer Bereich 29
Energereiche Strahlung 157
Engel-Verfahren 494
Entanglements 25
Entformung 431
Entformungsschragen 146
Entgasung 225
– Extruder 223
Entgraten 412
Enthalpie 110
Entropieelastischer Bereich 29
Entropieelastizität 25
Entspannungsversuch 89
Entzündbarkeit 165
Entzündungstemperatur 166
Environmental Stress Cracking 153
Epichlorhydrin 720
Epichlorhydrin-Kautschuk 738
Epoxid-Harze 708, 720, 725
Epoxidierte Produkte 544
Erodieren 146
Erosionsdurchschlag 132
Ersatz-E-Modul 469
Erstarrungsverhalten 63
Erweichungsverhalten 106
Ester aliphatischer Dicarbonsäuren 544
Etagenpresse 320
ETFE 560
Ethylacrylat 505
Ethylcellulose 685
Ethylen-Acryl-Copolymerisate 505
Ethylen-Acrylester-Kautschuk 735
Ethylen/Acrylsäure-Acrylat 502
Ethylen-Bitumen-Blend 508
Ethylen-Chlortrifluorethylen 560
Ethylen-Copolymere 495
Ethylenglykol 619, 629
Ethylen-(Meth)acrylsäure-Copolymere 505
Ethylen-Propylen-(Dien)-Copolymer 516
Ethylen-Propylen-(Dien)-Kautschuke 696, 735
Ethylen-Tetrafluorethylen 560
Ethylen-Vinylacetat-Copolymere 502, 523
Ethylen-Vinylacetat-Kautschuk 736
Ethylen/Vinylalkohol-Copolymer 504
Exo-Methylenlacton 570
Expandierbarer Graphit 760
Expandierter Graphit 779
Extender 539, 543
Extruderbauformen 219
Extrusion 218
– Blasformen 248
– Schnecke 221
– Systeme 219f.
– Werkzeuge 233
- F**
- Fäden 798
FAR 168
Farbe 141
Farbmessung 141
Farbmittel 669, 768
Farbprägungen 407
Farbspritzen 406
Farbstoffe 761
Farbton 761
Faser 781, 798
Faserabrieb 433
Faseraspektverhältnis 448
Faserausrichtung 438

- Faserherstellung 337
 Faserkonzentration 442
 Faserlänge 433, 448
 Faserlängenverteilung 433
 Faser-Matrix-Haftung 445
 Fasermatten 305
 Fasern 241
 – Harzspritzen 724
 Faserorientierung 435
 Faserpopulation 438
 Faserspinnen 339
 Faserverbundkunststoffe 301
 Federal Aviation Regulations 168
 Federal Motor Vehicle Safety Standard 302
 167
 FEM 451
 FEP 560
 Fertigungsgerechtes Konstruieren 430, 435,
 442
 Feststoffmischer 200
 Feuchtigkeitsaufnahme 149
 Feuchtigkeitsgehalt 186
 Fibride 487, 512
 Fibrillieren 241
 Ficksches Gesetz 148
 Filmanschnitt 282
 Filmscharniere 362, 474
 Filtereffizienz 347
 Finite-Elemente-Analyse 452
 Flachfäden 798
 Flachs 675, 679, 789
 Flammoxidieren 400
 Flammschutzmittel 669, 758
 Flamm-spritzen 405
 Flexibilisatoren 765
 Flexo-Druck 405
 Fließfähigkeit 77
 Fließfähigkeitslinien 77
 Fließfront 436
 Fließfunktion 77
 Fließkurven 58f., 78
 Fließort 77
 Fließortkurve 78
 Fließtemperatur 29
 Fließverhalten 23, 54, 420
 Flowability 74
 Fluidinjektionstechnik 269
 Fluor-Copolymerisate 560
 Fluor-Elastomere 560
 Fluoreszenz 764
 – Farbstoffe 764
 Fluorierung 410
 Fluor-Kautschuk 737
 Fluor-Phosphazene-Kautschuk 751
 Fluorpolymere 553
 Fluorsilikone 746
 Flüssigkristalline Polymere 34, 654
 Folien 236
 – Bändchen 798
 – Verbunde 243
 Formaldehyd 571
 Formaldehyd-Formmassen 699
 Formbeständigkeit
 – Temperatur HDT 105
 – Wärme 105
 Formen 276
 Formenbau 276
 Formfrei-Sintern 556
 Formfüllungsanalyse 455
 Formmasse-Spezifische Kennwerte 52
 Formprint-Verfahren 406
 Formschaumstoffe 671
 Formschlüssige Verbindung 428
 Formverschäumung 674
 Formwerkzeuge 276
 Formzwang 65
 Fotoätzen 146
 Fotoinitiatoren 327
 Fotolumineszenz 689
 Freistrahlbildung 260
 Friktionsmischer 294
 Fügen 195, 367
 Füllschaumstoffe 671, 674
 Füllstoffe 669, 769, 773
 Füllstoff-Orientierung 71
 Fungizide 769
 Funkenüberschläge 136
 Funktions
 – Elemente 474
 – Polymere 655
 – Werkstoff 18
 Furanharz 721
 Furfurylalkohol 721
 Furnaceverfahren 773
 Fused Filament Fabrication (FFF) 335
 Fused Layer Modeling (FLM) 333
 Fußbodenbeläge 243

G

Galvanisieren 409
Gas-Durchlässigkeit 161
Gasgegendruckverfahren 271
Gashinterdruckverfahren 270
Gasinjektionstechnik (GIT) 300
Gasphasenfluorierung 410
Gasphasen-Polymerisationsverfahren 511
Gebäudebewehrung 794
Gebrauchstemperatur 106
Gefügeeigenschaften 464
Gegentaktspritzgießen 269
Geschäumte Profile 239
Gewebe-Prepregs 717
Gießen 288
Glanz 140
- Grad 140, 146
Glas 771
- Einfriertemperatur 29
- Faser 784
- Faserorientierung 269
- Übergänge 101, 182
- Zustand 29
Glasplattenverstärkte Thermoplaste (GMT) 306
Glasübergangsbereich 29
Glasübergangstemperatur 102
Gleichgewichts-Wasseraufnahme 147
Gleiteigenschaften 583
Gleitmittel 753
Gleitreibung 168
Glimmentladungen 132
Glimmer 771, 776
Glühdrahtprüfung 167
Glühdrahtschneiden 414
Glukoserest 680
Glykoldmethacrylate 550
Granulated Molding Compounds 717
Granulator 202
Granulierer 206
Granuliervorrichtungen 211
Grenzfläche 445
Grenzflächenpolarisation 124
Grünlingherstellung 265
Gummiaufbereitung 209
Gusspolyamide 609

H

Haarrisse 154
Haftreibung 168
Haftschichten 411
Haftvermittler 218, 765
Halogene 759
HALS 756
Hanf 669, 679, 789
Harnstoff-Harze 720
Härtbare Formmassen 698
Härtemessung 84
Härteprüfverfahren 85
Hartgummi 727
Hartschaumstoffe 673
- Platten 298
Harzinfusionstechnik 309
Harzmatten 717
Haupteinfriertemperatur 29
Haupteinsatzgebiete 15
Heavy-Tow-Fasern 790
Heißabschlag 212
Heißgießverfahren 677
Heißkanal 255
Heißmischen 201
Heißprägefolien 407
Heißschaum 671
Heißschmelz-Verfahren 245
Heizdrahtmethode 190
Heizelement-Muffenschweißen 388
Heizelement-Stumpfschweißen 371, 387
Heizkeilschweißen 389
Heizwendelschweißen 388
Heizwert 112, 165f.
Herstellungskosten 427
Hetsäureanhydrid 710
Hexa-Härter 719
Hexamethyldisiloxan 411
Hexamethyldiamin 585
Hexamethylentetramin 719
Hexandiol 697
Hexen 502
Hilfsstoffe 753
Hinterschnitt 68, 431
Hinterspritztechnik 300
Hitzebeständigkeit von Elastomeren 729
Hochdruck 405
Hochdruckmaschinen 291
Hochdruck-RTM (HP-RTM) 312

Hochdruckverfahren 484
 Hochfrequenzschweißen 395
 Hochgeschwindigkeitssintern (HSS) 332
 Hochleistungsreifen 795
 Hohlkammer-Profile 234
 Hohlkörper 248
 Homogenisierung 225
 Hosenmischer 200
 Hot Melt 245
 Hybridbauweise 273
 Hybridtechnik 256
 Hydantoin 659
 Hydratcellulose 681
 Hydrierter NBR-Kautschuk 734
 Hydrocracking 421
 Hydro-Cure-Verfahren 494
 Hydrolyse 421
 Hydrophile Schichten 411
 Hydrophobe Schichten 411

I

Imidazolderivate 668
 Imprägnierung 314
 Impulsmethode 190
 Induktionsschweißen 395
 Industrieruß 773
 Infrarotschweißen 374
 Infrarot-Spektroskopie 180
 Injektionsmischkopf 296
 Ink-Jet-Technik 406
 Inline-Dosierung 291
 In-Mold Labelling 274
 In-Mold-Surfacing Film 274
 Innere Eigenschaften 38
 Insert-Molding-Verfahren 274
 Inserts 478
 Integralschaumprozess 240
 Integralschaumstoff 286, 674
 Integralstrukturen 271
 Intervall-Spritzgießen 269
 Intrinsisch 687
 – leitfähige Kunststoffe 138
 Intrudieren 259
 Intrusionsverfahren 259
 Intumeszenz 758
 Ionenbindung 19
 Ionenviskosität 183
 Ionisierenden Strahlen 157

Ionomere 19, 505f.
 Isochrones Spannungs-Dehnungs-Diagramm
 89, 469
 Isocyanat 660, 666, 724
 Isocyanat-Kennzahl 662
 Isocyanurat 660
 Isolationsverhalten 125
 Isolierstoffe 123
 Isopren-Kautschuk 731
 Isopren-Styrol-Kautschuk 734
 isotaktisch 20, 511
 Isotaxie-Index 26

J

Jetten 746
 Jute 669, 789

K

Kalanderbeschickung 202
 Kalandrieren 246
 Kalibrator 240
 Kaltes Plasma 402
 Kaltgießsysteme 677
 Kaltgranulieren 213
 Kalthärtung 710
 Kaltschaum 671
 Kalttiefziehen 363
 Kampfer 684
 Kanteneinrißfestigkeit 81
 Kaolin 771, 775
 Kapillarrheometer 57
 Kapillarviskosimeter 191
 Karl-Fischer-Verfahren 152
 Karussellmaschine 360
 Kaschieren 244
 Kaskaden-Extruder 224
 Kaskadenspritzgießen 269, 274, 281
 Katalysatoren 668
 Kautschuke 727, 731
 Kegelguss 279
 Kegel-Platte-Rheometer 57
 Kegel-Schnecken-Mischer 201
 Keimbildner 768
 Kennwertfunktionen 53
 Keramik 264, 771
 Kerben 468
 Kernprägen 262

- Kernresonanz-Spektroskopie 181
Kern-Schale-Rand-Struktur 435
Kernschicht 439
Ketone 721
Ketongruppe 639
Kicker 766
Kieselsäure 550, 775 ff.
Kleben 397
Kleiderbügelverteiler 236
Knäuelstruktur 31
Kneter 202 ff., 207 f.
Knetschneckenextruder 205
Koaleszenz 199
Kohlenstofffaser 790
Kohlenstoffpartikel 779
Kohlenwasserstoff-Harze 727
Ko-Kneter 202
Kokos 675
Kolben-Spritzgießmaschine 258
Komplementärfarben 141
Kompressibilität 75, 119, 188
Kompressions-Modul 99
Kondensationsreaktion 585
Kondensationsvernetzung 741
Konfiguration 19 f.
Konformation 20
Konische Schnecken 230
Konstitution 19, 22
Konstruktion 423
Konstruktionskatalog 426 ff.
Kontakttemperatur 115
Kontilaminat-Pressen 320
Kopfgranulierung 212
Korrosion 134
Korrosivität 166
Kraftstoff-Behälter 168
Kraftstofftanks 249
Kratzbeständigkeit 403
Kratzfestbeschichtung 411
Kratzfestigkeit 410 f.
Kreide 771
Kreislaufwirtschaft 417
Kriechen 30, 469
Kriechmodul 90 f.
Kriechstrom 133
Kriechversuche 89
Kriechwegbildung 133
Kristallbildung 31
Kristalline Überstrukturen 31
Kristallisation 37
– Grad 31
– Verhalten 41
Kristallisationsgrad 41
Kristallisationstemperatur 120
Kristallitbildung 31
Kritische Dehnung 93, 472
Kugeleindruckverfahren 154
Kunstfaser 798
Kunstleder 244
Kunststoffabbau 420
Kunststoffe 15
Kunststoff-Hauptgruppen 27
Kunststoffklassen 35
Kunststoffverbunde 44
Kurzfaserverstärkte Verbundkunststoffe 303
Kurzzeit-Biegeversuch 82
Kurzzeit-Zugversuch 79
K-Werte 191, 538
- L**
- Labelling 250
Lacke 677
Lackieren 403
Lactam 695
Lactone 669
Lamcoat-Verfahren 277
Laminare 319
Laminieren 244
Langfaserverstärkte Thermoplaste 307
Langglasfasern 786
Laser
– Beschriftung 406, 765
– Schneiden 415
– Strahlen 406
– Strahltrennen 415
Laserdurchstrahlschweißen 384
Lasersintern (LS) 330
Lastangriff 451
Lastenheft 425
Latente Katalysatoren 668
Laurinlactam 585, 695
Lebensdauer-FEM 453
Leichtbeton 724
Leiterpolymere 27, 657
Leitfähige
– Polymerbeschichtungen 403
– Polymere 687

- Thermoplast-Compounds 687
 Leitfähige Füllstoffe 138
 Leitfähigkeit 125, 128
 Leitfähigkeitsruß 758
 Leitlacke 403
 Leitpfade 780
 LFI-Verfahren (Lang-Faser-Injektion) 300
 Lichtbögen 133
 Lichtbogen-Festigkeit 134
 Lichtbogenverdampfen 277
 Lichtdurchlässigkeit 139
 Lichtechtheit 156
 Lichtschutzmittel 756
 Lignin 680
 Lineare Polyester 27
 Liquid Crystal Polymers 34
 LOI (Limiting Oxygen Index) 167
 Longitudinalwellen-Modul 99
 Lost-Foam-Verfahren 535
 Lösungs-Viskosimetrie 191
 Low Density R-RIM 300
 Lubonyl-Verfahren 494
 Luftfeuchte 148
 Luftstromprallmühlen 214
 Lunker 69
 Luvitherm-Verfahren 537
 Lyocell 789
 Lyotrope LCP 34

M

Magnesiumhydroxid 669
 Magnetische Füllstoffe 780
 Maillefer
 - Zonen 202
 Maleinsäureanhydrid 488
 Manuelle Sortierung 419
 Mark-Houwink Gleichung 24
 Martensgrad 105
 Maßänderungen 66
 Masse-Polymerisation 535
 Masterbatch 764
 Material Jetting (MJ) 330
 Materialmodell 462
 Matrix 433
 Matrixversteifung 45
 Matten 785
 Maxwell-Gleichung 124
 Mechanische Dämpfung 95, 181
 Mechanischer Verlustfaktor 95
 Mechanische Spektroskopie 181
 Mechanisches Verhalten 79
 Mehretagen-Werkzeuge 283
 Mehrfachanspritzung 281
 Mehrfarben-Spritzgießen 265
 Mehrkomponentenspritzgießen 265, 300
 Mehrschicht-Extrusion 242
 Mehrschichtige Bahnen 243
 Melamin 759
 Melamin-Formaldehyd 720
 Melaminharz-Schaumstoffe 721
 Melamin-Phenolharz-Formstoffe 702
 Melamin-Polyesterharz-Formstoffe 703
 Meltblown-Verfahren 341
 Melt-Elektrospinning 351
 Melt Extrusion Manufacturing (MEM) 333
 Melt Flow Index 62
 Mesogene 34, 654
 Mesomorph 34
 Mesomorpher Zustand 654
 Mesophasen 34
 Metal Injection Molding 264
 Metallbedampfung 409
 Metalleffektpigment 763
 Metallhydroxide 760
 Metallisieren 408f.
 Metallkomplekxkatalysator 485
 Metallocen-Katalysatoren 484f., 505, 511,
 525, 735
 Metallsalze 760
 Metallschrauben 478
 Metallseifen 550
 Methacrylat 505
 Methacrylnitril 652
 Methacrylsäure 564, 652, 708
 Methode der Finiten Elemente 450, 469
 Methylamin 569
 Methylcellulose 684
 Methylen-Methyl-Butyrolacton 570
 Methylmethacrylat 653, 721, 724
 Methylmethacrylat-Copolymerisate 567
 Michel-Levy-Farbtafel 144
 Microballons 777
 Microspheres 724, 777
 MID 267
 Migration 158
 - Neigung 543
 Mikroben 157

Mikrokugeln 777
 Mikropräzisionsspritzgießen 258
 Mikro-S-Polymerisate 536
 Mikrospritzgießen 265
 Mikrostruktur 446, 464
 Mikrowellenschweißen 396
 Mikrozellular-Schaumspritzgießen 272
 Mischen 197
 Mischer 200
 Mischteile 202f.
 Mischungsregel 114
 Mischwerkstoffverbunde 44
 Mitteldruckverfahren 485
 Mittelebenenmodell 453
 Mittenrauwert 146
 M-Kautschuke 735
 Modellierung 459
 Modifizierung 42
 Moduln 97
 Mohs-Härte 773
 Molded Interconnect Device 267
 Molekulare Uneinheitlichkeit 25
 Molekulargewicht 421
 Molekulargewichtsverteilung 24
 Molekülbeweglichkeit 35
 Molekülorientierungen 39, 361
 Molekülverschlaufungen 25
 Molmasse 23, 191
 Monofilament 241
 Monomere 19
 Monomerweichmacher 547
 Monosandwich-Verfahren 268
 Monosil-Verfahren 494
 Montagespritzgießen 196, 265
 Montmorillonit 778
 Morphologische Struktur 28
 Mühlen 213
 Multi-Live-Feed-Injection-Molding 269
 Multipoint Data 48
 Multiskalenmodellierung 462
 Muttern 477
 MVR 62

N

Nachdruck 255, 269, 438
 Nachhärtung 416
 Nachkristallisation 41, 66, 187
 Nachschwindung 41, 66

Nachwachsende Füllstoffe 679
 Nadelverschlussdüsen 254, 280
 Nagetiere 158
 Nanocomposite 760, 777
 Nanofüllstoff 777f.
 Nanomerlacke 403
 Nanoröhrchen 779
 Nanotalkum 775
 Nanotubes 779
 Nanowhisker 771
 Narben 146
 Natta 511
 Natta-Katalysatoren 525
 Natural Fibre Injection (NFI) 300
 Naturfasern 679, 788
 Naturkautschuk 21, 728, 731
 Naturstoffe 679
 Nebendispersionsgebiete 101, 182
 Neopentylglykol 723
 Neopolen-Verfahren 487
 Netzgeometrie 452
 Nichtlinearitäten 452
 Nichtnewtonsche Fließen 31
 Niederdruck-Hochfrequenzmischer 294
 Niederdruckmaschine 291
 Niederdruckverfahren 296, 485
 Nieten 480
 Nitril-Butadien-Kautschuk 733
 Nitril-Chloropren-Kautschuk 733
 Nitrose-Kautschuk 750
 NMR 181
 Nominelle Bruchdehnung 80
 Non-Crimp-Fabrics 791
 Norbornen 505, 516, 524
 Normalien für Werkzeuge 284
 Novolake 719
 Nukleierungsmittel 33, 768
 Nullviskosität 61
 Nutbuchsensextruder 221

O

Oberflächenbehandlungen 399
 Oberflächenrauheit 169
 Oberflächenstruktur 146
 Oberflächenwiderstand 125, 128, 136
 Oil Extended Rubber 730
 Öbeständigkeit von Elastomeren 729
 OLED 689

Olefin-TPE 692
 Oligomere 25
 One-Shot-Verfahren 663
 Optische Aufheller 764
 Optisches Verhalten 138
 Organische Gläser 138
 Organismen 157
 Organosole 549
 Orientierung 71, 144, 457
 Orientierungsmuster 435
 Orientierungspolarisation 124
 Ormocere 403
 Ornat-Verfahren 406
 Ornatherm-Verfahren 406
 Ortschaum 674
 Oszillierende Schmelze 269
 Outsert-Technik 273
 Overmolding 265
 Oxethylcellulose 685
 Oxidations-Induktions-Zeit OIT 185
 Oxidativer Abbau 755
 Oxo-Abbaubarkeit 679

P

PAI-Faser 795
 Palmitinsäureester 683
 PAM-Verfahren 494
 Paraban-Säure 649
 Para-Phenylendiisocyanat 666
 Partikelförmige Feststoffe 72
 Partikelgrößenverteilung 73
 Partikelschaum 287
 Partikel-Schäumverfahren 487
 Parylene 658
 Pasten 549
 – Extrusionsverfahren 556
 PBI-Faser 795
 PBO-Faser 796
 PC 611
 PC-TMC 616
 PE-C 495
 PE-E 487
 Pektin 680
 Pelletized Molding Compounds 717
 PE-(M) 485
 Perfluoralkoxy-Polymere 561
 Perfluor-Kautschuk 737
 Perfluorvinylether 561
 Perkolationskurven 137
 Perkolationschwelle 780
 Perlglanzpigment 763
 Permeabilität 642
 Permeation 158
 Permeationskoeffizient 159
 Permittivität 183
 Peroxidvernetzung 494
 PET-Faser 797
 PFA 560
 Pflichtenheft 425
 Phenacrylat-Harze 708, 725
 Phenole 669
 Phenolharz-Schaumstoffe 720
 Phenoplaste 719
 – Formstoffe 702f.
 Phenylsilikone 746
 Phillips-Methode 485
 Phosphor 759
 Phosphorsäureester 544
 Phthalat-Weichmacher 544
 Physical Vapor Deposition 277
 Physikalisches Schäumen 285
 physikalische Vernetzungsstellen 36
 Pigmente 761, 768
 Pinolenwerkzeug 235
 Planetenschnecken 225
 Planetwalzen-Extruder 225
 Plasma
 – Behandlung 401
 – Polymerisation 411
 – Verfahren 411
 Plastette 407
 Plastifikator 202
 Plastifizieraggregat 252
 Plastifizierung 223
 Platisole 549
 Plate-Out-Effekt 539
 Poissonzahl 97
 Polarisationsoptik 40
 Polarwickelmaschine 315
 Polieren 146, 403
 Poly-2,6-Diphenyl-Phenylenoxid 659
 Poly-4-Methylpenten-1 523
 Polyacen 688
 Polyacetal 571
 Polyacetylen 688
 Polyacrylate 563
 Polyacrylnitril 563

- Polyacrylnitrilfaser 799
- Polyacrylnitril-Precursor 790
- Polyalkylenetherdiolen 695
- Poly- α -Methylstyrol 524
- Polyamide 27, 584
- Polyamid-Elastomere 695
- Polyamidfaser 799
- Polyamidimid 650
- Polyamidoamine 710
- Polyamid-TPE 692
- Polyamine 667, 710
- Polyanilin 688
- Polyaramide 794
- Polyaromaten 657
- Polyarylate 610, 628, 654
- Polyarylene 658
- Polyarylester 27, 658
- Polyaryletherketon 639
- Polyarylethersulfone 28, 633
- Polyarylsulfide 28
- Polyazomethine 654
- Polybenzimidazol 649
- Polybismaleininimid 649
- Polybromierte Diphenylether 759
- Polybutene 519
- Polybutylennaphthalat 629
- Polybutylenterephthalat 625f.
- Polycarbonat 611
 - Blends 617
 - Copolymere 616
 - Diöle 697
- Polychlorotrifluorethylen 559
- Polycyclische Pigmente 762
- Polycycloacrylnitril 659
- Polycyclobutadien 659
- Polycyclon 657ff.
- Polydicyclopentadien 524
- Polydimethylsiloxan 738f.
- Polyelektrolyt 19, 506
- Polyester 704
 - Amide 654
 - aromatischer Diöle 628
 - aromatisch, gesättigt 610
 - Carbonat 628, 652ff.
 - Diöle 697
 - Faser 799
 - Imid 654
 - Polyole 667
 - Terephthalsäure 619
 - Weichmacher 544
- Polyetheramine 667
- Polyetherblockamide 606ff.
- Polyethercarbonat 616
- Polyetherdiöle 697
- Polyetheretherketon 639
- Polyetherimid 651
- Polyetherpolyesterpolyole 667
- Polyetherpolyole 667
- Polyethylen
 - Chloriert 495
 - Copolymere 484
 - Dioxythiophen 688
 - Faser 796
 - Homopolymere 484
 - Naphthalat 629
 - Oxide 638
 - Terephthalat 619
 - Ultraleicht 502
 - Vernetzt 493
- Polyfluorethylenpropylen 561
- Polyformaldehyd 571
- Polyfuran 688
- Polyglykole 638
- Polyheterocyclus 657
- Polyhydantoin 659
- Polyhydroxyalkanoate 686
- Polyhydroxybuttersäure 686
- Polyhydroxyethylmethacrylat 563
- Polyhydroxyfettsäure 686
- Polyhydroxyvaleriansäure 686
- Polyimid 27, 644, 649
- Polyimidazopyrrolon 659
- Polyimidsulfon 652
- Polyisobuten 519ff.
- Polyisocyanat 289, 660
- Poly-Isophthalate 654
- Polyketon 691
- Polylactid 686
- Polymer 16
- Polymerbildungsreaktionen 26
- Polymerblends 43, 197
- Polymerlegierungen 43
- Polymermischungen 42
- Polymethacrylate 564
- Polymethacrylatmethylimid 653
- Polymethacrylimid 652
- Polymethacrylmethylimid 569
- Polymethylmethacrylat 564

- Polymilchsäure 686
 Polymonochlorparaxylylen 658
 Poly-m-Phenylenisophthalamid 654
 Polynorbornen-Kautschuk 734
 Polyol 289, 662, 667
 Polyolefine 483
 Polyolefin-Elastomere 490, 696
 Polyolefinfaser 800
 Polyoxipropylendiamin 667
 Polyoxymethylen 571
 Polyparaphenylen 688
 Polyparaphenylnylylen 688
 Polyparapyridin 688
 Polyperfluortrimethyltriazin-Kautschuk 751
 Polyphenylenamin 690
 Polyphenylenbutadien 688
 Polyphenylene 658
 Polyphenylenether 636 f.
 Polyphenylenether-Blends 636
 Polyphenylensulfid 630, 688
 Polyphenylenterephthalamid 794
 Polyphosphazene 751
 Polyphthalamide 607
 Poly-p-Hydroxybenzoat 658
 Poly-p-Methylstyrol 524
 Poly-p-Phenylenterephthalamid 654
 Polypropylen
 - Copolymerisate 515
 - Homopolymerisate 508
 Polypropylenoxid 638
 Poly-p-Xylylene 658
 Polypyrone 659
 Polypyrrol 688
 Polysaccharide 685
 Polysiloxane 19
 Polystyrole 525
 - Block-Copolymere 696
 - Elastomere 696
 - Expandiert 534
 - Hartschaumstoff 534
 - Metallocenkatalysator 525
 - Schaumstoff 534
 - Schlagzäh 529
 - Sulfonat 690
 Polysulfid-Kautschuk 749
 Polyterephthalat-Blends 627
 Polyterephthalate 654
 Polytetrafluorethylen 556
 - Fasern 800
 Polytetrahydrofuran 639
 Polythioester 654
 Polythiophen 688
 Polytriazine 650
 Polytrimethylenterephthalat 627
 Polyurethan 660
 - Abfallverwertung 665
 - Acrylatharze 564
 - Arbeitssicherheit 664
 - Aufbau 660
 - Brandverhalten 664
 - Elastomere 697
 - Faser 677, 801
 - Kautschuk 677
 - Kettenverlängerer 668
 - Klebstoffe 677
 - Lacke 677
 - Mikroapseln 677
 - Rohstoffe 665
 - Verfahrenstechnik 289
 - Vernetzer 668
 Polyvinylacetat 551
 Polyvinylalkohol 504, 551
 Polyvinylalkoholfaser 800
 Polyvinylbenzole 524
 Polyvinylbutyral 552
 Polyvinylcarbazol 529, 552
 Polyvinylchlorid 549
 Polyvinylchlorid-hart 535
 Polyvinylchlorid-weich 543
 Polyvinylfluorid 558
 Polyvinylformal 552
 Polyvinylidenchlorid 551
 Polyvinylidenfluorid 558
 Polyvinylmethylether 552
 Polyvinylpyrrolidon 553
 Post-Consumer-Abfälle 418
 Postprocessing 452
 Potenzgesetz 24, 60
 Powder Injection Molding 264
 PP+EPDM-Elastomer-Blends 516
 PP chloriert 515
 PP-Copolymere 515
 PP-CR 511
 PP galvanisierbar 518
 PP glasfaserverstärkt 518
 PP-R 511
 PP-Schaumstoffe 512
 Prägekalander 243

Prägen 407
Pre-Consumer-Abfälle 417
Prepolymer 663
Prepolymer-Verfahren 289, 663
Prepregbänder 717
Prepreg-Herstellung 317
Prepregs 698
Preprocessing 452
Pressen von Duroplasten 319
Pressmassen 698
Pressverbindung 481
Primärweichmacher 543
Probekörper 52
Produktentwicklung 424
Produktionsvolumen 13
Propylenglykol 705
Propylenoxid-Kautschuk 738
Propylen-Tetrafluorethylen-Kautschuk 737
Prototyp 473
Prozesssimulation 450
PS-E 534
PS-HI 529
PS-Leichtschaum 534
PS-(M) 525
PS-Partikelschaum 534
PS-S-(M) 525
PTFEAF 560
Pultrusion 316
Pulver-Beschichtung 404
Pulverextrusion 556
Pulverlackieren 404
Pulver-Slash-Verfahren 405
Pulverspritzgießen 264
Punktanguss 278
PUR-Elastomere 750
PUR-H 673
PUR-I 674
PUR-M 677
PUR-Spritzmaschinen 296
PUR-Sprühmaschinen 296
PUR-Systeme 291
PUR-W 671
PVC-C 536
PVC-(E) 535
PVC-E 550
PVC-HI 540
PVC-(M) 535
PVC-P 535, 543
PVC-P-Organosole 549

PVC-P-Pasten 549
PVC-P-Plastisole 549
PVC-P-Schäume 550
PVC-(S) 535
PVC-U 535
pvT-Diagramm 64, 119
Pyknometer 100
Pyrolyse 758
Pyrrone 657

Q

Quasielastischer Ersatzkennwert 469
Quelldehnung 152
Quellströmungseffekt 435
Quellung 152
Querkontraktion 97
Querkontraktionszahl 470
Querkürzung 97
Querszahl 97

R

Radikalische Vernetzung 741
Raman-Spektroskopie 180
Ram-Extruder 487, 556
Ramie 789
Randfaserdehnung 82
Rapid Manufacturing 324
Rapid Prototyping 323
Rapid Tooling 324
Rapsöl 667
Rauchentwicklung 166
Rauigkeit 146
Reaction Injection Molding (RIM) 674
Reaktionsharze 698
Reaktionsschaumgießen 674
Recycling 417
– gemischter Kunststoffe 418
Recyclingmaterial 218
Reflexion 140
– Verluste 139
Reibpartner 176
Reibschlüssige Verbindung 428
Reibung 168
Reibungskoeffizient 177
Reibungsschwingung 169
Reihenpunktanschnitt 282

- Reinforced Reaction Injection Molding (R-RIM) 300
 Reinigungsgranulat 263
 Relaxation 30, 187
 – Modul 90
 – Versuch 89
 Remissionskurven 141
 Repräsentatives Volumenelement 462
 Resin Transfer Molding 311
 Resistenzfaktoren 94
 Retardation 30
 – Versuch 89
 Reverse-Roll-Coater 244
 Rheologisches Verhalten 54
 Rheometer 56
 RIM (Reaction Injection Molding) 299
 Rissbildung 153
 Rizinusöl 667
 Rohdichte 99f., 288
 Röhrenmischer 200
 Rohre 233
 Rohstoffliche Verwertung 421
 Rollfässer 200
 Rotationsformen 358
 Rotationsgießen 289
 Rotationsreibschweißen 379
 Rotationschmelzen 487
 Rotierende Feststoff-Mischbehälter 200
 Roving 785
 Ruckgleiten 169
 Rückstromsperre 252
 Rührwerksmischer 211
 Ruß 669, 773, 777
- S**
- Sandwich-Spritzgießen 267ff.
 Sättigungswerte 148
 Sauerstoffindex 167
 Schalenschicht 439
 Schalenteknik 275
 Schäume 549
 Schäumen 239ff., 285
 Schaumspritzgießen 271
 Schaumstabilisator 668, 757
 Schaumstoff 100, 286
 Schergeschwindigkeit 54
 Scherteil 202
 Scherviskosität 54
 Scherwalzen-Extruder 205f.
 Scherwinkel 98
 Scherzelle 79
 Schichtmodell 38f.
 Schichtpressen 319
 Schichtpressstoffe 218, 319
 Schichtsilikat 778
 Schiebung 98
 Schießbaumwolle 684
 Schimmelpilze 157
 Schlagarbeit 88
 Schlagversuche 87
 Schlagzähigkeit 88f.
 Schlagzähmacher 765
 Schlauch-Folien 238
 Schlichte 445
 Schmelze
 – Filter 218, 233
 – Massenfließrate MFR 62
 – Pumpen 233
 – Spinnverfahren 512
 – Volumenfließrate 62
 – Walzenverfahren 245
 – Wärme 33
 Schmelzeviskosität 55, 420
 Schmelzspinnen 338
 Schmelztemperatur 32
 Schnappverbindung 475
 Schneckenknetter 201, 204
 Schnellläufer-Extruder 225
 Schnitzelmassen 218
 Schrauben
 – Verbindungen 478
 Schraubverbindung 477
 Schrumpffolien 361
 Schrumpfschläuche 361
 Schrumpfung 40
 Schubmodul 30ff., 98, 101, 181
 Schubspannung 54, 98
 Schuhoberstoffe 244
 Schüttdichte 75
 Schüttwinkel 74
 Schutzkleidung 795
 Schutzplanen 244
 Schwebeverfahren 100
 Schweißen 369
 Schweißverbindung 480
 Schwerspat 669
 Schwindung 39, 63ff., 234, 456

- Differenz 68
- Schwindungsverhalten 67
- Sekantenmodul 81
- Sekundärweichmacher 543
- Selbstentzündungs-Temperatur 166
- Selbstformende Schrauben 478
- Selbstschneidende Schrauben 480
- Selbstverstärkende Polymere 654
- Sequenzielle Coextrusion 250
- Sequenzielle Copolymere 516
- Sequenzielles Spritzgießen 269
- Sequenzverfahren 268
- Sheet Molding Compounds 305, 717
- Shish-kebab-Strukturen 33
- Shore-Härte 84
- Sicherheitsdatenblatt 664
- Siebdorn 233
- Siebdruck 406
- Siebkorb 233
- Siegelpunkt 67
- Siegelzeit 63
- Silanvernetzung 494
- Silikate 669
- Silikon 19, 738
- Silikonfestkautschuk 739
- Silikonflüssigkautschuk 739
- Silikon-spritzgießen (LSR) 272
- Silo-Senkrechtmischer 201
- Simulation 450
- Single Point Data 48
- Sintertechnik 213
- Sioplas-Verfahren 494
- SiO_x-Beschichtung 409
- Sisal 675, 789
- Skinpack-Verfahren 366
- Slicen 323
- Small-Tow-Fasern 790
- SMS-Vliesstoffe 344
- Software 466
- Sol-Gel-Prozess 403
- Solid Phase Pressure Forming 512
- Solution-Elektrospinning 352
- Solvatation 29
- Spacer 34, 655
- Spanabhebende Bearbeitung 412
- Spannung
 - Durchschlag 129
 - Korrosion 153
 - Rissbeständigkeit 153
 - Rissbildung 93, 153
- Spannungs-Dehnungs-Diagramm 91
- Spannungs-Dehnungs-Linien 81
- Spannungstensor 75
- Spannungsübertragung 74
- Spannungsverhältnis 73
- Spezifische Enthalpie 110
- Spezifischer Durchgangswiderstand 125
- Spezifisches Volumen 119
- Spezifische Wärmekapazität 110
- Sphärolithe 31
- Spheripol-Verfahren 511
- Spherisil-Verfahren 494
- Spinn
 - Fäden 785
 - Fasern 487
- Spleißfasern 241
- Spleißfolien 798
- Splittfasern 798
- Spring-In-Effekt 70
- Spritzgieß
 - Sonderverfahren 430
- Spritzgießen
 - Pressen 321
- Stabilisatoren 755
- Standversuche 89
- Stangenanguss 278
- Stapelfasern 785
- Starter 766
- Statische Mischer 207
- Statisches Langzeitverhalten 89
- Statistische Copolymere 516
- Staubanziehung 136
- Staubuchsen 233
- Stegplatten 235
- Stempelknetzer 209
- Stereoisomere 21
- Stereolithografie (SLA) 327
- Sterisch gehinderte Amine 756
- Stick-Slip-Effekt 169
- Stifteindrückverfahren 154
- Stift-Scheibe-Prüfstand 172
- STL 323
- Stoffschlüssige Verbindung 428
- Stop-and-go-Prinzip 299
- Stoß 85
- Strahlenvernetzung 176, 415, 743
- Strainer 247
- Strangablegeverfahren 336

Strangaufweitung 234
 Strangpressen 321
 Streckdehnung 80
 Streckformen 364
 Streckspannung 80
 Streichen 244
 Streuung 139
 Structural Reaction Injection Molding (SRIM)
 301
 Strukturelemente 452
 Strukturgeschäumte Mattenlamine 724
 Strukturviskosität 31
 Strukturwerkstoff 17
 Styrol 721
 – Butadien-Kautschuk 732
 – Polymere 524
 – TPE 692
 Styromull 535
 Sulfohydrazide 766
 Suspensions-Polymerisation 535
 Syndiotaktisch 20, 511
 Synthesefaser 798
 Synthesekautschuke 728
 Systematisches Konstruieren 424

T

Tackifizier 521
 Tagesleucht-Farbstoffe 764
 Taktizität 20
 Talk/Talkum 771, 774
 Talkum 518
 Tandem-Extruder 224
 Tandemaschinen 256
 Tapes 717
 Tauchbaddekoriieren 406
 Tauchverfahren 404
 Tauglichkeit 153
 Taumelmischer 200
 Tauwasserbildung 165
 Teerpeche 790
 Teilaromatische Polyamide 606
 Teilkristallin 31, 36
 Temperatur
 – Index 108
 – Leitfähigkeit 115
 – Zeit-Grenzen 108
 Temperatureinwirkung 108
 Tempern 416
 Tenside 668
 Tensile Impact Strength 88
 Terephthalsäure 605, 619
 Termiten 158
 Terpolymere 526
 Tetrabrombenzoesäureester 669
 Tetrabrombisphenol 759
 Tetraederstruktur 20
 Tetrafluorethylen-Hexafluorpropylen-Copolymer
 561
 Tetramethyldiamin 585
 Textilglasfasern 785
 Textiltapeten 244
 TFEHFPVDF 560
 TFEP 560
 TGA 186
 Therimageverfahren 406
 Thermische Leitfähigkeit 189
 Thermisches Spritzen 411
 Thermisches Verhalten 101
 Thermoeffusionsdruck 406
 Thermofixierung 237
 Thermogravimetrische Analyse 186
 Thermomechanische Analyse 187
 Thermoplastische Elastomere 36f., 627, 692
 Thermoplastische Polyimide 650
 Thermoplastische Schaum-Extrusion (TSE) 239
 Thermoplastisches Olefin-Elastomer 696
 Thermoplastische Stärke 685
 Thermoplast-Schaum-Gießen 271
 Thermoplast-Schaum-Spritzgießen 534
 Thermotrope LCP 34
 Thiocarbonyldifluorid-Kautschuk 750
 Tiefdruck 405
 Tiefeneffekt 763
 Tiefziehen 364
 Titandioxid 777
 T-Kautschuke 749
 TMA 187
 Toleranzen 71
 Torsionspendel 101, 182
 Torsionsschwingungsversuch 182
 Toxizität 166
 Transferpressen 321
 Transmissionsgrad 139
 Transparenz 139
 Trans-Polyoctenamer-Kautschuk 734
 Treibmittel 197, 668, 766
 Trennen 414

Trennmittel 669, 753
Trennschweißen 414
Tribologische Eigenschaften 173
Tribologisches System 168
Trichlorethylphosphat 682
Triglyzeride 722
Triisocyanate 666
Trimellitate 544
Trimethylcyclohexan 616
Trimethylcyclohexan-Bisphenol 616
Trioxan 571
Trockenlufttrockner 217
Trockner 215
Trocknungsparameter 216
Trogknetter 209
Trommelziehverfahren 785
Trübung 140
Trübungszahl 140
Tunnelanschnitt 283
TVI-Test 152
Twin-Sheet-Verfahren 366
Typisierte Duroplast-Formmassen 699

U

Überlegformung 362
UL 94 166
Ultraschall-Reinigung 402
Ultraschallschweißen 382
Umformen 195, 361
Ummantelungen 235
Umwelteinflüsse 147
Underwriters' Laboratories 166
Ungesättigte Polyester 704, 721
Universalstab 79
Urethan-Kautschuk 750
Urethan-TPE 692
Urformen 195
UV-Absorber 756
UV-Schutzschichten 411

V

VAC 502
Vakuumentziehen 365
VARI 309
Verarbeitungsschwindigkeit 64, 67
Verarbeitungstechnische Kennwerte 54, 804
Verbrennungswärme 110, 165

Verbundbauteile 432
Verdichtung 64, 72, 75 ff.
Verdichtungsspannung 75
Verlustfaktor 101, 183
Verlustzahl 183
Vernetzte Elastomere 37
Vernetzte Polymere 421
Vernetzung 136, 176
Vernetzungssysteme 740
Verrippung 468
Versagenskriterien 472
Verschleiß 170
Verschleißbetrag 170
Verschleißkoeffizient 177
Verschleißrate 170
Verschlussdüsen 254
Verstärkungsfasern 301, 782
Verstreckung 118, 237
Verzug 39 ff., 69, 456
Verzweigungen 22
Vibrationsschweißen 377
Vicat-Erweichungstemperatur 105
Vielfach-Werkzeug 282
Vinylacetat 495, 721
Vinylchlorid-Copolymeren 548
Vinylester-Harze 708, 725
Vinylpolymere 535
Viskoelastizität 30
Viskosität 54, 191
Viskositätskurve 56
Viskositätsmittelwert 24
Viskositätsmodelle 60
Viskositätsverhältnis 191
Viskositätszahl 191, 538
Vliese 785
Vliesstoffherstellung 342
Vollelektrische Spritzgießmaschine 256
Vollprofile 234
Volumenelemente 464
Volumenmodell 453
Volumenschwindung 65
Vorbehandlung von Oberflächen 400
Vulkanfaser 685

W

Wabenkerne 795
Wahre Dehnung 86
Wahre Spannung 86

- Wanddicke 115
 Wärme
 – Ausdehnungskoeffizient 116
 – Behandlung 416
 – Durchschlag 132
 – Eindringzahl 115
 – Leitfähigkeit 112
 – Stabilisator 757
 Wärmekapazität 110
 Wärmeleitende Füllstoffe 781
 Wärmeleitfähigkeit 189
 Warmgas-Extrusionsschweißen 393
 Warmgas-Fächelschweißen 391
 Warmgas-Stumpfschweißen 375
 Warmgas-Ziehschweißen 392
 Warmhärtung 710
 Warmlufttrockner 216
 Wasser
 – Aufnahme 148
 – Dampf-Diffusions-Widerstandszahl 165
 – Dampf-Durchlässigkeit 159
 – Gehalt 152
 – Lacke 720
 – Leitungsrohre 93
 – Strahlschneiden 415
 Wasseraufnahme 593
 Wasserstoffbrückenbindungen 592
 Wasserstrahlverfestigung 344
 Weeping 158
 Weich
 – Gummi 727
 – Macher 543, 765
 – Schaumböcke 297
 – Schaumstoffe 671
 Weiterreißfestigkeit 81
 Welt-Kunststoffproduktion 14
 Wendelverteiler 233, 242
 Wendelverteilerwerkzeug 239
 Werkstoffauswahl 427, 432
 Werkstoffgerechtes Konstruieren 468
 Werkstoffkennwerte 48
 Werkstoffliche Verwertung 418
 – Primär 419
 – Sekundär 419
 Werkzeug 195, 276
 Werkzeugfüllsimulation 455
 Whiskers 777
 Wickelverfahren 313
 Wiederverarbeitung 417
 Williams-Landel-Ferry-Beziehung 62
 Windkraftanlagen 793
 Wirbelsintern 404, 487
 Wöhler-Kurve 95
 Wollastonit 669, 675, 771, 776
 Wood Plastics Compounds 790
- X**
- Xanthene 764
 XPS 534
- Z**
- Zähigkeit 87
 Zeitbruchlinien 93
 Zeit-Dehn-Linien 89
 Zeitstand-Festigkeitsverhalten 93
 Zeitstand-Innendruckversuch 93
 Zeitstandversuch 89
 Zellglas 685
 Zellregler 668
 Zersetzungsverhalten 186
 Ziegler-Katalysatoren 511
 Ziegler-Natta-Katalysatoren 520
 Ziegler-Verfahren 485
 Ziehformen 363
 Zitronensäureester 544, 683
 Zugfestigkeit 83
 Zugversuch 79, 87
 Zulässige Gebrauchstemperatur 101
 Zweikomponentenspritzguss 266
 Zweiplattenmaschine 256
 Zwischenschicht-Spritz-Technik 300
 Zykluszeit 250