

Dr. rer. nat. Dipl.-Chem. Adolf Franck

Kunststoff-Kompendium

**Herstellung, Aufbau, Verarbeitung, Anwendung,
Umweltverhalten und Eigenschaften der Thermoplaste,
Polymerlegierungen, Elastomere und Duroplaste**

4., neu bearbeitete und erweiterte Auflage

Bibliothek Fachbereich Chemie
Technische Universität Darmstadt

Fra 18

Vogel Buchverlag

PC 1707

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	5	2.2.2	Radikalische Polymerisation von Vinylchlorid	45
1 Grundbegriffe	13	2.2.3	Anionische Polymerisation von Cyanoacrylat	48
1.1 Definitionen	13	2.2.4	Kationische Polymerisation von Vinylether	50
1.2 Chemischer Aufbau	14	2.2.5	Stereospezifische Polymerisation von Propylen mittels Ziegler-Natta-Katalysatoren oder Metallocen-Katalysatoren	52
1.3 Definitionen zur Nomenklatur der Polymere	16	2.2.6	Ionische Polymerisation von Heterocyclen	58
1.3.1 Deklination	16	2.2.7	Additionspolymerisation als Stufenreaktion (APS)	60
1.3.2 Kurzzeichen	16	2.2.8	Kondensationspolymerisation (KP)	62
1.3.3 Trivialname Tn	16	2.2.9	Polymerisation durch oxidative Kopplung	64
1.3.4 Monomereinheit ME (monomeric unit) nach IUPAC	16	2.2.10	Molmasse der Makromoleküle	65
1.3.5 Herkunftsbezogener Name hN	17	2.2.11	Copolymerisation	65
1.3.6 Konstitutionelle Repetiereinheit KRE (englisch: Constitutional repeating unit) nach IUPAC	17	2.2.11.1	Überwiegend lineare Ketten	65
1.3.7 Strukturbezogener Name sN nach IUPAC	17	2.2.11.2	Pfropfcopolymerisation	67
1.3.8 Kunststoffgruppe Kg	17	2.2.12	Allgemeine Erscheinungen bei der Polymerisation	68
1.3.9 Beispiele zur Nomenklatur	17	2.3	Technologie der Polymerisation	71
1.4 Makromoleküleigenschaften als Ursache der Werkstoffeigenschaften	22	3	Aufbau und thermische Eigenschaften der Standard- und Hochleistungskunststoffgruppen	79
1.4.1 Gestalt der Makromoleküle	22	3.1	Grundbegriffe und Übersicht	79
1.4.2 Ordnung der Makromoleküle	24	3.2	Teilkristalline Thermoplaste	84
1.4.3 Nebenvalenzkräfte und ihr Einfluß auf das Verhalten der Kunststoffe	25	3.2.1	Zustandsbereiche und Übergangstemperaturen	84
1.4.4 Die Kunststoffgruppen: Thermoplaste – Polymerlegierungen – Elastomere – Duroplaste	26	3.2.2	Auswirkungen der Übergangstemperaturen	90
1.5 Zusammenfassung der Werkstoffeigenschaften	29	3.2.3	Herkunft und Bedeutung thermodynamischer Daten	90
1.6 Vergleich der Kunststoffe mit Metallen, Keramik, Glas	30	3.2.4	Schmelzwärme und Kristallinitätsgrad	92
2 Kunststoffherstellung (Polymerisation)	35	3.2.5	Dichte und Kristallinitätsgrad	93
2.1 Grundbegriffe und Übersicht	35	3.2.6	Kennzeichnung der Wendelstruktur (Helix)	94
2.1.1 Einteilung der Polymerisationsarten	35	3.2.7	Kristallisationsgeschwindigkeit	95
2.1.2 Struktur und Polymerisationsneigung von C=C-Monomeren	38	3.3	Homogene amorphe Thermoplaste	96
2.2 Reaktionsmechanismen	44	3.4	Polymerlegierungen	104
2.2.1 Additionspolymerisation als Kettenreaktion (APK)	44			

3.4.1	Definition	104	4.2.5.4	Extrudieren von Rohren	165
3.4.2	Verträglichkeit verschiedener Polymere untereinander	104	4.2.5.5	Ummantelung von Elektrokabeln	166
3.5	Schlagzähe Thermoplaste und ihr Wirkungsmechanismus	110	4.2.5.6	Herstellen von Textilfasern	166
3.6	Thermoplastische Elastomere	112	4.2.5.7	Coextrusion	168
3.7	Chemisch weitmaschig vernetzte Elastomere	116	4.2.6	Folienblasen	168
3.7.1	Thermisches Verhalten	116	4.2.7	Spritzgießen	169
3.7.2	Chemischer Aufbau und Beständigkeit	117	4.2.8	Blasformen von Hohlkörpern	177
3.8	Vernetzte Reaktionsharze	120	4.2.8.1	Extrusionsblasformen	177
3.9	Engmaschig vernetzte Duroplaste	123	4.2.8.2	Spritzblasen und Spritzstreckblasen	182
3.10	Verbundwerkstoffe mit Kunststoffen	124	4.2.9	Pressen	183
3.10.1	Eigenschaften von Verbundwerkstoffen	124	4.2.9.1	Chemisch vernetzbare Formmassen	183
3.10.2	Auswirkungen durch die chemische Natur der Verstärkungstoffe	125	4.2.9.2	Glasmatteverstärkte Thermoplaste (GMT)	183
3.10.3	Geometrie der Verstärkungstoffe bezüglich Wirkung und Verarbeitbarkeit	130	4.2.10	Schäumen	185
3.10.4	Haftvermittler	131	4.2.11	Beschichten	188
3.11	Hochtemperaturfeste Kunststoffe, Hochtemperaturablation	132	4.2.12	Verarbeiten von Kunststoffpulver	188
3.11.1	Polymere mit reiner Kohlenstoffhauptkette	132	4.2.13	Verarbeiten von Pasten	190
3.11.2	Polymere mit aliphatisch gebundenen Heteroatomen in der Hauptkette	133	4.2.14	Verarbeiten von Lösungen	192
3.11.3	Polymere mit Heterocyclen in der Hauptkette	135	4.2.15	Verarbeiten von Kautschukemulsionen	192
3.11.4	Polymere mit Leiterkonfiguration	139	4.2.16	Verarbeiten von flüssigen Reaktionsharzen zu GFK	192
3.11.5	Kunststoffe zur Hochtemperaturablation	140	4.2.17	Rapid Prototyping	193
3.12	Selbstverstärkende flüssigkristalline Polymere	141	4.3	Warmformen (Umformen) von thermoplastischem Halbzeug	197
3.13	Elektrisch leitfähige Kunststoffe	144	4.3.1	Temperaturbereiche für das Warmformen	197
3.14	Ferromagnetischer Kunststoff	146	4.3.2	Warmformen durch Vakuum oder Überdruck	198
4	Kunststoffverarbeitung	147	4.3.3	Prägen	199
4.1	Grundbegriffe und Übersicht	147	4.3.4	Abkanten und Biegen	200
4.2	Urformen	154	4.3.5	Recken und Schrumpfen	200
4.2.1	Hilfsstoffe für die Verarbeitung	154	4.4	Fügen	200
4.2.2	Aufarbeiten der Rohstoffe und Lieferformen	156	4.4.1	Kunststoffschweißen (Thermoplaste)	200
4.2.3	Temperaturbereiche und Schergeschwindigkeiten für das Urformen	157	4.4.2	Kleben	202
4.2.4	Kalandrieren	157	4.4.3	Schnappverbindung	205
4.2.5	Extrudieren	161	4.4.4	Schrauben, Nieten	205
4.2.5.1	Grundbegriffe des Extrudierens von Vollprofilen	161	4.5	Oberflächenbearbeitung und Veredeln der Kunststoffe	205
4.2.5.2	Extrudieren von Platten mit dem Breitschlitzwerkzeug	165	4.6	Spanende Bearbeitung (Trennen)	205
4.2.5.3	Extrudieren von Sinterwerkstoffen	165	5	Kunststoffanwendungen	207
			5.1	Grundlagen	207
			5.2	Maschinenbau, Apparatebau	207
			5.3	Bautechnik	208
			5.4	Kfz-Technik	210
			5.5	Luft- und Raumfahrt	214
			5.6	Elektrotechnik, EDV	214
			5.7	Kernkraftwerkstechnik	216
			5.8	Medizin	216
			5.9	Sport	217
			5.10	Haushalt	218
			5.11	Verpackungen	218
			5.12	Landwirtschaft, Gartenbau	218

5.13	Textilindustrie, Fasern	219	8	Einzelbesprechung der Kunststoffe	307
5.14	Anwendungen und Eigenschaften von Elastomeren	219	8.1	Grundbegriffe und Übersicht zum Hauptkettenaufbau der Kunststoffe	307
5.15	Produktionsdaten	222	8.1.1	Polarität und Beständigkeit der Kunststoffe mit reiner Kohlenstoffhauptkette	307
6	Kunststoffe und Umwelt	225	8.1.2	Polarität und Beständigkeit der Kunststoffe mit Heteroatomen in der Hauptkette	309
6.1	Grundlagen und Übersicht	225	8.1.3	Beständigkeit von Duroplasten . .	310
6.1.1	Umweltpolitik und Umweltmanagement (UM)	225	8.2	Polymere mit reiner Kohlenstoffhauptkette	310
6.1.2	Ganzheitliche Bilanzierung	226	8.2.1	Polyethylen	310
6.2	Vorschriften zum Umweltschutz . .	226	8.2.1.1	PE-Homopolymer	310
6.3	Lebensmittelverpackung, Spielwaren, Medizin	227	8.2.1.2	Verzweigungen und Kristallinität .	310
6.4	Luftreinhaltung	227	8.2.1.3	Molmasse	311
6.5	Ozonschichtschädigung und Treibhauseffekt	228	8.2.1.4	Eigenschaften, Verarbeitung und Anwendungen	311
6.6	Abwasser	229	8.2.1.5	Copolymere des Ethylens	312
6.7	Verhalten auf der Deponie	229	8.2.1.6	Blends von Polyethylen mit anderen Polymeren	317
6.8	Nachwachsende Rohstoffe, abbaubare Kunststoffe	229	8.2.1.7	Chemische Abwandlungen des Polyethylens	318
6.9	Rückgewinnung (Recycling)	230	8.2.2	Polypropylen	318
6.10	Kunststoffe in der Umweltschutztechnik	232	8.2.2.1	Polymerisation	319
7	Kunststoffeigenschaften	233	8.2.2.2	Allgemeine Eigenschaften, Verarbeitung und Anwendung . .	320
7.1	Grundbegriffe und Übersicht, Qualitätsmanagement nach DIN EN ISO 9000 ff.	233	8.2.2.3	Copolymere und Polyblends . . .	321
7.2	Beständigkeit von Kunststoffen . .	235	8.2.3	Polybuten-1	322
7.2.1	Beständigkeit gegen Bewitterung .	235	8.2.4	Weitere Polyalkene (Polyolefine)	324
7.2.2	Beständigkeit gegen Säuren, Laugen, Heißwasser	238	8.2.4.1	Poly(methylpenten)	324
7.2.3	Spannungsrißbildung in Abhängigkeit von Spannung, Medium und Temperatur	238	8.2.4.2	Polyisobutylen	324
7.2.4	Permeation beim Kunststoff- Kraftstoff-Behälter (KKB)	242	8.2.5	Polystyrol und seine Modifikationen	325
7.2.5	Praktische Beständigkeits- einstufung und ihre Begründung . .	242	8.2.5.1	Polystyrol – Homopolymer	325
7.2.6	Flammfestigkeit	246	8.2.5.2	Übersicht der Copolymere und Blends	326
7.2.7	Wirkung von energiereichen Strahlen	249	8.2.5.3	Statistische Copolymere	326
7.3	Kennwerte	250	8.2.5.4	Pfropfcopolymere und Polyblends als schlagzähe amorphe Thermoplaste	328
7.3.1	Mechanische Eigenschaften	250	8.2.5.5	3-Block-Copolymere als thermoplastische Elastomere . . .	330
7.3.2	Molmasse, Fließverhalten und verarbeitungstechnische Eigenschaften	254	8.2.5.6	Verarbeitung und Anwendungen von Polystyrolkunststoffen	332
7.3.3	Thermische Kennwerte	257	8.2.5.7	Polystyrolschaum (expandierbares Polystyrol)	332
7.3.4	Physikalisch-chemische Kennwerte, Verhalten bei Einflüssen von außen	258	8.2.5.8	Galvanisieren von ABS	333
7.3.5	Elektrische Kennwerte	259	8.2.5.9	Polymerisate von Styrolabkömmlingen	333
7.4	Kunststoffeigenschaften in Tabellen	260	8.2.6	Synthesekautschuktypen	333
			8.2.6.1	Konstitution der ungesättigten Kautschuktypen	333
			8.2.6.2	Polymerisation	334
			8.2.6.2.1	Emulsionspolymerisation	334

8.2.6.2.2	Stereospezifische Polymerisation	334	8.3.1.2	Herstellung der Polyamide	365
8.2.6.2.3	Lösungspolymerisation	335	8.3.1.2.1	Polymerisationsarten	365
8.2.6.3	Verarbeitung der Rohpolymerisate	335	8.3.1.3	Allgemeine Eigenschaften der aliphatischen Polyamide	366
8.2.6.4	Vulkanisation	335	8.3.1.4	Abgewandelte Polyamidarten	367
8.2.6.5	Butadien-Elastomere	336	8.3.1.5	Verarbeitung von Polyamiden	368
8.2.6.6	Styrol/Butadien-Elastomer	336	8.3.1.6	Anwendungen	369
8.2.6.7	Acrylnitril/Butadien-Elastomer (Nitrilkautschuk)	337	8.3.1.7	Herstellung von Polyamidfolien	369
8.2.6.8	Isopren-Elastomer	339	8.3.1.8	Lacke, Beschichtungen, Klebstoffe	369
8.2.6.9	Isopren/Isobutylen-Copolymer (Butylkautschuk)	339	8.3.2	Lineare Polycarbamate (Polyurethane)	370
8.2.6.10	Chlorbutadien-Elastomer	340	8.3.3	Lineare Polyester	370
8.2.6.11	Cyclopenten-Elastomer	341	8.3.3.1	Herstellung	370
8.2.7	Halogenhaltige Polymere	341	8.3.3.2	Polyterephthalate	371
8.2.7.1	Poly(vinylchlorid)	341	8.3.3.2.1	Chemisch einheitliche Polyterephthalate	371
8.2.7.1.1	Hart-PVC (PVC-U)	341	8.3.3.2.2	Blockcopolymere als thermoplastische Elastomere	372
8.2.7.1.2	Weich-PVC (PVC mit Weichmacherzusatz)	344	8.3.3.3	Polycarbonate	373
8.2.7.1.3	Polyblends mit PVC als schlagzähe PVC-Typen	346	8.3.3.4	Polyester vom Hydroxysäuretyp	374
8.2.7.1.4	Pfropfcopolymere als schlagzähe PVC-Typen	347	8.3.4	Polyoxymethylen (Polyacetal)	375
8.2.7.1.5	Statistische Copolymere	348	8.3.5	Polyether	376
8.2.7.1.6	Chemische Abwandlung: nachchloriertes PVC	348	8.3.5.1	Herstellungsprinzip	376
8.2.7.2	Poly(vinylidenchlorid)	349	8.3.5.2	Polyethylenoxid	376
8.2.7.3	Poly(tetrafluorethylen)	350	8.3.5.3	Polypropylenoxid	376
8.2.7.4	Poly(chlortrifluorethylen)	351	8.3.5.4	Polyadditionsprodukte von Ethylenoxid und Propylenoxid an Amine, Alkohole, Phenole usw.	376
8.2.7.5	Poly(vinylidenfluorid)	352	8.3.5.5	Polyether-block-amid Thermoplast-Formmassen	377
8.2.7.6	Poly(vinylfluorid)	352	8.3.5.5.2	PEBA für das Reaktionsstritzgießen	378
8.2.7.7	Fluorhaltige Copolymere	352	8.3.5.6	Chlorepoxypropan-Elastomer	379
8.2.7.8	Fluorcarbon-Elastomer	353	8.3.5.7	Phenoxyharz	379
8.2.8	Poly(vinylether)	354	8.4	Vernetzte Duroplaste und Reaktionsharze	379
8.2.9	Poly(vinylacetat)	355	8.4.1	Klassische Kondensationsharze	379
8.2.10	Poly(vinylpropionat)	355	8.4.1.1	Übersicht	379
8.2.11	Poly(vinylalkohol)	356	8.4.1.2	Phenoplaste	380
8.2.12	Poly(vinylacetale)	357	8.4.1.2.1	Produktübersicht	380
8.2.13	Acrylpolymerisate	358	8.4.1.2.2	Vorkondensation	380
8.2.13.1	Poly(acrylsäureester) (Acrylharze) und Copolymerisate	358	8.4.1.2.3	Härtung	380
8.2.13.2	Poly(methacrylsäuremethylester)	360	8.4.1.2.4	Verarbeitung der Vorkondensate	381
8.2.13.3	Poly(acrylnitril)	361	8.4.1.3	Aminoplaste	381
8.2.13.4	Poly(vinylidencarbonitril)	362	8.4.2	Vernetzte Polyester	382
8.2.13.5	Poly(cyanoacrylat)	362	8.4.2.1	Ungesättigte Polyester	382
8.2.13.6	Poly(methacrylimid)-Schaumstoff	362	8.4.2.1.1	Produktübersicht	382
8.2.13.7	Poly(acrylamid)	362	8.4.2.1.2	Härtung	384
8.2.14	Poly(vinylamine)	362	8.4.2.1.3	Eigenschaften	386
8.2.14.1	Poly(vinylcarbazol)	362	8.4.2.1.4	Verarbeitung	386
8.2.14.2	Poly(vinylpyrrolidon)	363	8.4.2.1.5	Glasfaserverstärkte Kunstharze	387
8.2.14.3	Poly(vinylpyridin)	363	8.4.2.2	Polyesterharze (meist ungesättigt) als Lacke	387
8.3	Polymere mit Heteroatomen in der Hauptkette	363	8.4.3	Epoxyharz (Epoxidharz)	388
8.3.1	Polyamide	364			
8.3.1.1	Produktübersicht und Nomenklatur	364			

8.4.3.1	Produktübersicht und Nomenklatur	388	8.5.3.7	Keramik aus (halb-)metall-organischen Stoffen	415
8.4.3.2	Synthese des Ausgangsharzes	388	8.5.3.8	Dämpfe von Methylsilanen	415
8.4.3.3	Kalthärtung mit Polyaminen	389	8.5.3.9	Fluorsiloxane	415
8.4.3.4	Härtung durch ionische Polymerisation von Epoxygruppen	390	8.5.3.10	Polyfluorsiloxane	415
8.4.3.5	Warmhärtung	391	8.5.4	Andere Polymere mit anorganischer Hauptkette	415
8.4.3.6	Abgewandelte Epoxyharze	391	8.6	Abgewandelte Naturprodukte	416
8.4.3.7	Verarbeitung, Verwendung	392	8.6.1	Kunststoffe auf Grundlage der Cellulose	416
8.4.3.8	Eigenschaften der Epoxyharze	393	8.6.1.1	Regenerierte Cellulose	416
8.4.4	Vernetzte Polycarbamate (Polyurethane)	393	8.6.1.1.1	Pergamentpapier	417
8.4.4.1	Nomenklatur und Produktübersicht	393	8.6.1.1.2	Kupferoxid-Ammoniak-Verfahren	417
8.4.4.2	Verarbeitung der Vorprodukte in einem Schritt (Reaktionsharze)	396	8.6.1.1.3	Viskoseverfahren	417
8.4.4.2.1	Allgemeines	396	8.6.1.2	Celluloseester	417
8.4.4.2.2	Gieß-, Streich- und Spachtelmassen	397	8.6.1.2.1	Cellulosenitrat	417
8.4.4.2.3	Schaumstoffe	397	8.6.1.2.2	Organische Celluloseester	417
8.4.4.2.4	Polyurethan-Injektionsmassen	399	8.6.1.2.3	Eigenschaften, Anwendungen	418
8.4.4.2.5	Polyurethanlacke und -klebstoffe	402	8.6.1.3	Celluloseether	418
8.4.4.2.6	1-Komponenten-Systeme	402	8.6.2	Kunststoffe auf Proteinbasis	419
8.4.4.3	Verarbeitung über Voraddukte	403	8.6.3	Naturkautschuk und Abwandlungsprodukte	419
8.4.4.3.1	PUR-Elastomer	403	8.6.4	Polymerisate aus ungesättigten Naturölen	419
8.4.4.3.2	PUR-Hartelastomer	404	8.7	Ionenaustauscher (Austauscherharze)	420
8.4.4.3.3	Thermoplastisches PUR-Elastomer	405			
8.4.4.3.4	Vulkanisierbares PUR-Elastomer	405	Anhang		
8.4.4.3.5	Zelliges PUR-Elastomer	405		Geschichtliche Entwicklung der Kunststoffe und Elastomere	423
8.4.4.3.6	Elastomere Fäden	406			
8.4.5	Methylmethacrylat-Reaktionsharz	406		Quellenverzeichnis	425
8.4.6	Alkylensulfid-Elastomere	406			
8.4.7	Triazinharze	407		Weiterführende Literatur	429
8.4.8	Furanharze	407			
8.5	Polysiloxane (Silicone) und andere Polymere mit anorganischer Hauptkette	408		Formelzeichen der im Buch verwendeten Formeln	445
8.5.1	Aufbau und Eigenschaften der Polysiloxane	408			
8.5.2	Synthese der Polysiloxane	409		Glossar	449
8.5.3	Siloxanprodukte	409			
8.5.3.1	Siloxanharze	409		Kurzzeichen der Kunststoffe	455
8.5.3.2	Hartschaum	411			
8.5.3.3	Siloxankautschuk	411		Stichwort- und Abkürzungsverzeichnis	460
8.5.3.3.1	Vernetzte, hochmolekulare Polydimethylsiloxane	411			
8.5.3.3.2	Bor-Siloxan-Elastomere	414		Hinweis auf verbesserte Lern- und Rechenmöglichkeiten mit Diskette	
8.5.3.4	Siloxanöle	414		<input type="checkbox"/> Wissensbasiertes Computer Based Training zur Kunststoffherstellung (Prof. Dr. C. Möbus)	458
8.5.3.5	Siloxanpasten – Siloxanfette	414		<input type="checkbox"/> Übungsfragen und Rechenprogramme	459
8.5.3.6	Siloxandispersionen und -lösungen	414			