

Christian Bonten

Kunststofftechnik

Einführung und Grundlagen



HANSER



Bleiben Sie auf dem Laufenden!

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

www.hanser-fachbuch.de/newsletter

Die Internet-Plattform für Entscheider!

Exklusiv: Das Online-Archiv der Zeitschrift Kunststoffe!

Richtungsweisend: Fach- und Brancheninformationen
stets top-aktuell!

Informativ: News, wichtige Termine, Bookshop, neue
Produkte und der Stellenmarkt der Kunststoffindustrie

Kunststoffe.de

Christian Bonten

Kunststofftechnik

Einführung und Grundlagen

3., aktualisierte Auflage

HANSER

Der Autor:

Prof. Christian Bonten,
Universität Stuttgart, Institut für Kunststofftechnik (IKT),
Pfaffenwaldring 32, 70569 Stuttgart

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:

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

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

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

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

© 2020 Carl Hanser Verlag München

www.hanser-fachbuch.de

Lektorat: Ulrike Wittmann

Herstellung: Jörg Strohbach

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

Coverrealisierung: Max Kostopoulos

Satz: Kösel Media GmbH, Krugzell

Druck und Bindung: Druckerei Hubert & Co GmbH und Co KG BuchPartner, Göttingen

Printed in Germany

ISBN: 978-3-446-46471-1

E-Book-ISBN: 978-3-446-46538-1

Vorwort

■ Vorwort zur 3. Auflage

Während der Arbeit an dieser Auflage standen Kunststoffe – ähnlich wie in den 1980er Jahren – wieder sehr heftig in der Kritik. Gerne lege ich Ihnen daher das Kapitel 6 „Kunststoffe und Umwelt“ besonders ans Herz. Es soll der sachlichen Aufklärung dienen und stellt manche in diesen Jahren durch die Tagesmedien verbreiteten Zusammenhänge klarer dar.

Kunststoffabfälle in der Umwelt schaden dem Ansehen der gesamten Werkstoffklasse. Aus meiner Sicht ist jedoch nicht der Werkstoff, sondern der Mensch alleine für die Umweltverschmutzung verantwortlich. Unsere derzeitigen Lebensgewohnheiten helfen dabei jedoch wenig: denn wir leben in einer – nein wir sind eine – Wegwerfgesellschaft!

Wenn wir daran festhalten, sind Einwegprodukte aus anderen Werkstoffen interessanterweise meist schlechter für die Umwelt als diejenigen aus Kunststoff. Zahlreiche Ökobilanzen beweisen, dass Produkte aus Kunststoff, seien es die kurzlebigen oder auch die langlebigen, die Umwelt weniger schädigen als diejenigen aus anderen Werkstoffen. Grundsätzlich zeigen Produkte, die lange im Einsatz sind, die bessere Ökobilanz. Es gilt, die Wegwerfgesellschaft zu verteufeln, nicht Kunststoffe! Vielleicht sollten Produkte und Dienstleistungen zukünftig auf Basis von Ökobilanzen besteuert werden? Eventuell mit einem Quotienten „Umweltverbrauch pro Nutzungsdauer“? Der Verbraucher würde sich meist automatisch für das weniger umweltschädlichere, weil kostengünstigere Produkt entscheiden und die Hersteller sind raus aus der Zwickmühle.

Aber bei aller Kritik: auch Einwegprodukte können einen wichtigen Nutzen darstellen, wenn es um Hygiene z.B. bei Lebensmitteln und in der Medizintechnik geht. In Angesicht des Corona-Virus COVID-19 wird bevorzugt wieder zu eingeschweißten Nahrungsmitteln gegriffen und viele infizierte Menschen in der Notfallmedizin sind glücklich, nicht mit wiederverwendeten, ausgekochten Spritzen, durchgespülten Schläuchen und Tropfkammern versorgt zu werden.

Abfälle in der Umwelt – egal welchen Werkstoffs – entstehen aufgrund von mangelnder Disziplin. Umweltschutz fängt bei jedem Einzelnen von uns an! In der dritten Auflage habe ich oben erwähntes Kapitel „Kunststoffe und Umwelt“ ausgebaut und weitere Fehler in Text und Bildern beseitigt.

Stuttgart im April 2020

■ Vorwort zur 1. Auflage

Direkt nach meinem Dienstantritt am Institut für Kunststofftechnik in Stuttgart im Spätsommer 2010, überarbeitete ich gleich mit Hilfe der mir anvertrauten wissenschaftlichen Mitarbeiter die Vorlesung „Grundlagen der Kunststofftechnik“. Diese wichtige Vorlesung wurde bereits seit langer Zeit unverändert in Stuttgart gehalten. Wir aktualisierten bei der Überarbeitung nicht nur Bilder und Inhalte, sondern gaben der Vorlesung eine neue Struktur, die ich – inspiriert durch didaktische Seminare des Deutschen Hochschulverbands – für zeitgemäßer halte. Zahlreiche in den Vorlesungen genutzte Filmsequenzen ermöglichten den Studenten, die Inhalte schneller zu verstehen. Ich bin mir sicher, die Studenten für das bevorstehende Berufsleben mit umfassendem grundlegendem Kunststoffwissen auszustatten. Wer das Fach vertiefen möchte, kann dies jeweils in den drei Hauptgebieten „Werkstofftechnik“, „Verarbeitungstechnik“ und „Produktentwicklung“ tun.

Diese einführende und grundlegende Vorlesung bedient als sogenanntes Wahlfach mit vier Unterrichtsstunden pro Woche Masterstudenten der Verfahrenstechnik, des Maschinenbaus (u.ä. wie Produktionstechnik, Kraftfahrzeugtechnik), der Materialwissenschaften und des Technologiemanagements. Die Vorlesung ist eigentlich auf technisch vorgebildete Studenten ausgerichtet, dennoch wählen sie inzwischen auch nichttechnische Studenten. Während nach dem Wintersemester 2010 etwa 100 Studenten dieses Fach prüfen ließen, wurden es nach den Wintersemestern 2011, 2012 und 2013 jeweils etwa 100 Studenten mehr. Die wachsende Menge höchst interessierter und disziplinierter Masterstudenten verleitete mich dazu, die Bilder mit Fließtext zu ergänzen und in Buchform herauszugeben.

Studenten des Winters 2012/13 sprachen mich auf die kritischen Themen an, die man „in den Medien so hört“. Ich beschloss daraufhin, den Themen „Umweltverschmutzung“, „Gifte in Kunststoffen“ und „Biokunststoffe“ bis hin zur Urquelle auf den Grund zu gehen und dies ebenfalls als Vorlesungsteil aufzubereiten. Diese Themen bilden in diesem Buch das Abschlusskapitel und ich habe den Eindruck, dass sachliche Information das beste Mittel zur Aufklärung ist. Der Leser möge entscheiden, ob mir ein sachlicher Umgang mit den Themen gelungen ist.

Ich danke dem Verlag herzlich, dieses Buch in Farbe und mit Hardcover für einen Preis anzubieten, der es für Studenten noch erschwinglich macht. Auch danke ich den unterstützenden Mitarbeitern (s. u.), denn ohne sie wäre das Buch nicht „rund“ geworden. Jeder wissenschaftliche Mitarbeiter hat mindestens ein Unterkapitel aufmerksam durchgearbeitet und wertvolle Hinweise auf Fehler und zur Verständlichkeit des Textes gegeben. Technische Mitarbeiter haben mich mit Bildern aus ihrem Arbeitsalltag unterstützt. Besonders hervorheben möchte ich die Herren Dipl.-Ing. Stefan Epple (Gesamtkoordination), Dipl.-Wirt.-Ing. Oliver Kast („roter Faden“ und Schlagworte), M. Eng. Tristan Koslowski und Manuel Hodrius (Bilder) sowie Dipl.-Phys. Nikolai Gulnizkij (Filme).

Ich bin sicher, jedem Leser/Studenten mit dem Wissen des Buches die Möglichkeit zu geben, schnell in der Kunststoffbranche Fuß zu fassen und ihn früh zur Entscheidung zu befähigen, in welcher Anwendung Kunststoffe Großartiges leisten.

Stuttgart, im Mai 2014

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Christian Bonten

Bedanken möchte ich mich weiterhin bei den Mitarbeitern die an der ersten Auflage beteiligt waren:

- Dipl.-Ing. W. Adebahr
- M.Sc. J.A. Avila
- Dipl.-Ing. O. Celik
- Dipl.-Ing. S. Epple
- Dipl.-Ing. T. Erb
- Dipl.-Phys. P. Fey
- Dipl.-Ing. B. Formisano
- M.Sc. L. Goebel
- M.Sc. S. Göttermann
- Dipl.-Phys. N. Gulnizkij
- Dipl.-Ing. J. Heyn
- Dipl.-Ing. N. Holtmann
- Dipl.-Ing. O. Kast
- G. Keck
- M. Eng. T. Koslowski
- Dr.-Ing. M. Kroh
- S. Liebert
- A. Mason
- Dr. J. Mauri
- U. Müller
- M.Sc. M. Musialek
- Dipl.-Ing. B. Neubig
- S. Osterloh
- Dipl.-Ing. M. Poindl
- Dipl.-Ing. M. Rahammer
- M. Simmet
- M.Sc. O. Skrabala
- Dr. rer. nat. S. Weinmann
- M. Eng. F. Willems

Der Autor: Prof. Christian Bonten



Univ.-Prof. Dr.-Ing. Christian Bonten leitet das Institut für Kunststofftechnik (IKT) in Stuttgart, eines der führenden deutschen Forschungsinstitute auf dem Gebiet der Kunststofftechnik. Nach Studium des Maschinenbaus in Duisburg und der Kunststoffverarbeitung an der RWTH in Aachen promovierte Prof. Bonten bei Univ.-Prof.Dr.-Ing. Ernst Schmachtenberg auf dem Fachgebiet Kunststofftechnik. Nach mehreren Jahren technischer Verantwortung und später Geschäftsverantwortung bei der BASF sowie dem Biokunststoffhersteller FKUR wurde er 2010 von der Universität Stuttgart zum Direktor und Leiter des IKT berufen. Das Institut arbeitet auf allen Gebieten der Kunststofftechnik: der Werkstofftechnik, der Verarbeitungstechnik und der Produktentwicklung.

Hinweise zur Benutzung des Buches

Die Besonderheit dieses Buches ist die Verwendung sogenannter Quick-response-codes (kurz QR-Codes), welche im Jahr 1994 in Japan entwickelt wurden. Sie werden in diesem Buch genutzt, um das Smartphone mit dem Youtube-Kanal des IKT zu verbinden und einen zum Thema passenden Film oder eine passende Animation ablaufen zu lassen. Den Nutzern dieses Buches bietet dies die Verschmelzung des „erstarrten“ gedruckten Buches mit den höchst beweglichen Möglichkeiten der neuen Medien.

QR-Codes ermöglichen – ganz ähnlich wie die aus dem Lebensmittelhandel bekannten Strichcodes – durch das Abscannen die Übertragung einer Information. Sie sind eine quadratische Matrix aus schwarzen und weißen Punkten, welche die kodierten Daten im Binärcode darstellen. Heutzutage benötigt man keinen besonderen Scanner mehr, sondern scannt den Code einfach mit geeigneter Software („App“) auf seinem Smartphone.

Für die Nutzung der Barcodes muss eine entsprechende App (zu finden z. B. unter den Suchbegriffen „QR Code Reader“ oder „QR Code Scanner“) auf dem Smartphone installiert sein. Nun muss das Smartphone noch Internetzugang haben, um den Youtube-Kanal des IKT im Internet zu erreichen. Nach Starten der App sollte der QR-Code im Suchfeld anvisiert werden: die Information wird meist schnell erkannt und schon läuft der passende Youtube-Film automatisch ab. Wer die Filme nacheinander anschauen möchte, tippt bei Youtube einfach „Institut für Kunststofftechnik“ ein. Manche der Filme haben eine Tonspur, daher: Lautsprecher an!



Hier kann ein Video abgespielt werden.

<http://www.ikt.uni-stuttgart.de/links/Videolinks/Hinweis>

Sollten Lehrkräfte an Schulen o.ä. die in diesem Buch verwendeten Bilder für ihre nicht kommerziellen Unterrichtszwecke verwenden wollen, senden wir diese gerne zu. Wir bitten, darauf zu achten, dass die „Quelle: C. Bonten, Kunststofftechnik, 2020, Carl Hanser Verlag“ stets genannt wird.

Inhalt

Vorwort	V
Vorwort zur 3. Auflage	V
Vorwort zur 1. Auflage	VI
Der Autor: Prof. Christian Bonten	IX
Hinweise zur Benutzung des Buches	XI
1 Einleitung	1
1.1 Kunststoff – Werkstoff der Moderne	1
1.2 Einsatzgebiete von Kunststoffen	5
1.3 Kunststoffe und Design	8
1.4 Literaturverzeichnis	11
2 Grundlagen	13
2.1 Von Monomer zu Polymer – Grundlagen der Polymerchemie	13
2.1.1 Herkunft der Monomere	13
2.1.2 Polymersynthese	16
2.1.2.1 Polymerisation	16
2.1.2.2 Copolymerisation (Sonderform der Polymerisation) ...	19
2.1.2.3 Polykondensation	20
2.1.2.4 Polyaddition	21
2.1.3 Die Molmasse von Polymeren	22
2.1.4 Bindungskräfte und Brown'sche Molekularbewegung	28
2.1.4.1 Inermolekulare chemische Bindungen	28
2.1.4.2 Intermolekulare physikalische Bindungen	30
2.1.4.3 Brown'sche Molekularbewegung – Beweglichkeit der Polymerketten	33
2.1.5 Mechanismen der Erstarrung und Unterteilung der Polymere ..	34

2.1.6	Primärstruktur von Polymeren: Konstitution und Konfiguration	38
2.1.7	Sekundär- und Tertiärstrukturen von Polymeren: Konformation	39
2.1.7.1	Amorphe Strukturen	41
2.1.7.2	Kristalline Strukturen	42
2.1.7.3	Einfluss der Primärstruktur	42
2.1.7.4	Überstrukturen	45
2.1.8	Polymere – Rohstoff nicht nur für Kunststoffe	49
2.2	Grundlagen der Kraftübertragung	50
2.2.1	Wichtige Begriffe	50
2.2.1.1	Festigkeit	50
2.2.1.2	Steifigkeit	50
2.2.1.3	Zähigkeit	50
2.2.1.4	Spannungs-Dehnungs-Diagramme	51
2.2.2	Zustandsbereiche von Kunststoffen	54
2.2.2.1	Glasübergangstemperatur T_g	55
2.2.2.2	Kristallitschmelztemperatur T_m	56
2.2.2.3	Zustandsbereiche vernetzter Polymere	57
2.2.3	Mechanische Ersatzmodelle	58
2.3	Kunststoff und Kunststofftechnik – Begriffsbestimmung	62
2.4	Literaturverzeichnis	64
3	Kunststoff-Werkstofftechnik	67
3.1	Verhalten in der Schmelze – Fließeigenschaften und deren Messung .	68
3.1.1	Strömungsmechanische Grundlagen	69
3.1.2	Einflüsse auf das Fließverhalten	76
3.1.3	Das Konzept der repräsentativen Viskosität	81
3.1.4	Dehnung von Schmelze	84
3.1.5	Strangaufweitung und Schrumpf	86
3.1.6	Rheometrie – die Messung der Fließeigenschaften	88
3.1.6.1	Die Messung des Schmelzemassefließrate MFR	89
3.1.6.2	Das Hochdruck-Kapillarrheometer	91
3.1.6.3	Rotationsrheometer	92
3.1.6.4	Dehnrheometer	97
3.2	Verhalten als Festkörper – Festkörpereigenschaften und deren Messung	98
3.2.1	Mechanische Eigenschaften von Kunststoffen	100
3.2.1.1	Der Zugversuch	100
3.2.1.2	Der Schnellzerreiversuch	103

3.2.1.3	Zeit- und Temperatureinfluss auf das mechanische Verhalten	104
3.2.1.4	Der Zeitstandversuch	107
3.2.1.5	Der Schwingversuch	109
3.2.1.6	Der Biegeversuch	112
3.2.2	Physikalische Eigenschaften	114
3.2.2.1	Elektrische Eigenschaften	114
3.2.2.2	Magnetische Eigenschaften	117
3.2.2.3	Optische Eigenschaften	118
3.2.2.4	Akustische Eigenschaften	125
3.2.3	Werte für den Wärme- und Stoffaustausch	127
3.2.3.1	Spezifische Enthalpie h	128
3.2.3.2	Spezifische Wärmekapazität c_p	129
3.2.3.3	Dichte ρ	132
3.2.3.4	Wärmeleitfähigkeit λ	133
3.2.3.5	Wärmeausdehnungskoeffizient α	136
3.2.3.6	Temperaturleitfähigkeit a	137
3.2.3.7	Wärmeeindringzahl b	139
3.2.3.8	Stofftransport	139
3.3	Beeinflussung der Eigenschaften durch Zusatzstoffe	144
3.3.1	Verstärkungsstoffe – Aktive Zusatzstoffe	144
3.3.1.1	Die Fasern und das Prinzip der Verstärkung	148
3.3.1.2	Die Aufgaben der Matrix	151
3.3.1.3	Kraftübertragung des Faserkunststoffverbunds	152
3.3.1.4	Defekte in Faserkunststoffverbunden	156
3.3.1.5	Nanopartikel als aktive Zusatzstoffe	160
3.3.2	Funktions-Zusatzstoffe – Additive	162
3.3.2.1	Viskositätsverändernde Zusatzstoffe – Fließhilfsmittel	162
3.3.2.2	Weichmacher	163
3.3.2.3	Zumischung anderer Polymere – Bildung von Polymerblends	165
3.3.2.4	Schlagzähmodifizierer	165
3.3.2.5	Keimbildner (Nukleierungsmittel)	167
3.3.2.6	Haftvermittler	168
3.3.2.7	Leitfähige Zusatzstoffe	169
3.3.3	Füllstoffe – Inaktive Zusatzstoffe	170
3.4	Von Polymer zu Kunststoff – Einführung in die Kunststoff-Aufbereitung	171
3.4.1	Der Doppelschneckenextruder	172
3.4.2	Verfahrenstechnik	173

3.4.3	Charakteristische Kennwerte	177
3.4.4	Zusatzaggregate	178
3.5	Prozess, Struktur, Eigenschaften – Beeinflussung im Verarbeitungsprozess	181
3.5.1	Eigenspannungen	182
3.5.2	Orientierung von Makromolekülen	183
3.5.3	Orientierung von Fasern	186
3.5.4	Kristallisation	187
3.5.5	Bildung einer Makrostruktur: Schäumen von Kunststoffen	187
3.6	Veränderungen mit der Zeit – Einblick in die Alterung von Kunststoffen	189
3.6.1	Alterungsursachen	190
3.6.2	Alterungsvorgänge	191
3.6.2.1	Mechanische Alterungsmechanismen	191
3.6.2.2	Physikalische Alterungsmechanismen	192
3.6.2.3	Chemische Alterungsmechanismen	194
3.6.2.4	Wirkweise von Alterungstabilisatoren	196
3.6.3	Alterungserscheinungen	197
3.6.4	Charakterisierung des Alterungsfortschritts	198
3.7	Kurzdarstellung einiger wichtiger Kunststoffe	201
3.8	Polyethylen (PE)	205
3.9	Polypropylen (PP)	206
3.10	Ethylen-Propylen-(Dien)-Copolymere (EPDM)	207
3.11	Polyvinylchlorid (PVC)	210
3.12	Polystyrol (PS)	212
3.13	Styrol-Butadien-Styrol-Copolymere (SBS)	214
3.14	Styrol-Acrylnitril-Copolymere (SAN)	215
3.15	Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymere (ABS)	218
3.16	Acrylnitril-Styrol-Acrylester-Copolymere (ASA)	219
3.17	Polyamid (PA)	222
3.18	Polybutylenterephthalat (PBT)	228
3.19	Polyethylenterephthalat (PET)	229
3.20	Polycarbonat (PC)	232
3.21	Polymethylmethacrylat (PMMA)	234
3.22	Polyoxymethylen (POM)	236
3.23	Polytetrafluorethylen (PTFE)	239

3.24	Polyetheretherketon (PEEK)	240
3.25	Polyethersulfon (PES) und Polysulfon (PSU)	242
3.26	Polyphenylensulfid (PPS)	244
3.27	Cellulosederivate	246
3.28	Polyhydroxyalkanoate (PHA)	248
3.29	Polylactid (PLA)	249
3.30	Thermoplastisches Polyurethan (TPE-U, auch TPU)	251
3.31	Polyurethan (PUR)	252
3.32	Epoxidharze (EP)	253
3.33	Melaminformaldehydharz (MF)	255
3.34	Phenol-Formaldehyd- oder Phenolharz (PF)	256
3.35	Harnstoff-Formaldehydharz (UF)	257
3.36	Ungesättigtes Polyesterharz (UP)	258
3.37	Literaturverzeichnis	259
4	Kunststoff-Verarbeitungstechnik	263
4.1	Extrusion	264
4.1.1	Extruderschnecke und Zylinder	265
4.1.2	Der Hochleistungsextruder Helibar®	273
4.1.3	Rohr- und Profilextrusion	275
4.1.4	Flachfolien- und Plattenextrusion	281
4.1.5	Schlauch- und Blasfolienextrusion	282
4.1.6	Extrusions-Blasformen	284
4.1.7	Co-Extrusion	285
4.2	Spritzgießen	288
4.2.1	Der Spritzgießprozess	290
4.2.2	Das Plastifizieraggregat	293
4.2.3	Die Schließeinheit mit Spritzgießwerkzeug	296
4.2.3.1	Rheologische Auslegung	299
4.2.3.2	Thermische Auslegung	300
4.2.4	Einfluss des Spritzgießprozesses auf die Eigenschaften des Bauteils	303
4.2.5	Vorstellung einiger Sonderverfahren	306
4.2.5.1	Spritzprägen	307
4.2.5.2	Thermoplastschaum-Spritzgießen	308
4.2.5.3	Kaskaden-Spritzgießen	309
4.2.5.4	Spritzgießcompoundieren	310

4.2.5.5	Mehr-Komponenten-Verfahren	311
4.2.5.6	Sandwich-Spritzgießen	313
4.2.5.7	Fluidinjektionstechniken	315
4.2.5.8	Hinterspritztechnik	317
4.2.5.9	Spritzstreck-Blasformen	318
4.2.5.10	Variotherme Werkzeugtemperierung	320
4.3	Verarbeitung von vernetzenden Kunststoffen	321
4.3.1	Pressen	323
4.3.2	Transferpressen	325
4.3.3	Spritzgießen	325
4.3.4	Verarbeitung von Polyurethan	326
4.4	Technologie der Faserkunststoffverbunde	331
4.4.1	Handlaminieren und Faserspritzen	332
4.4.2	Pressen von SMC und GMT	333
4.4.3	Pultrusion von Endlosfasern	336
4.4.4	Arbeiten mit Prepregs	338
4.4.5	Harzinjektionsverfahren	339
4.4.6	Dreidimensionale Faserkunststoffverbundstrukturen	341
4.5	Weiterverarbeitung	343
4.5.1	Thermoformen	343
4.5.2	Mechanische Bearbeitung von Kunststoffen	351
4.5.3	Schweißen	354
4.5.3.1	Heizelementschweißen	356
4.5.3.2	Ultraschallschweißen	360
4.5.3.3	Vibrationsreibschweißen	362
4.5.3.4	Laserschweißen	363
4.5.4	Kleben	364
4.5.5	Fügen durch Schnappverbindungen, Schrauben und Nieten ...	369
4.5.6	Beschichten von Kunststoffen	372
4.5.6.1	Beschichtete Bauteile	372
4.5.6.2	Beschichtungsverfahren	376
4.6	Literaturverzeichnis	380
5	Produktentwicklung mit Kunststoffen	383
5.1	Kunststoffe als Konstruktionswerkstoffe	384
5.1.1	Kunststoffspezifische Alleinstellungsmerkmale	384
5.1.2	Werkstoffvorauswahl	388
5.2	Geometrische Unterteilung von Produkten	390
5.2.1	Großflächige Produkte	390
5.2.2	Gehäuseartige Produkte	391

5.2.3	Behälterartige Produkte	392
5.2.4	Komplexe Produkte	392
5.2.5	Funktionsspezifische Produkte	393
5.2.6	Bedeutung für die Wahl des Verarbeitungsverfahrens	393
5.3	Konstruieren mit Kunststoffen	395
5.3.1	Anforderungen an Produkte und Funktionen	396
5.3.2	Nutzen der Gestaltungsfreiheit – Integration von Funktionselementen	399
5.3.3	Nutzung der Gestaltungsfreiheit – Erhöhung des Flächenträgheitsmoments	404
5.3.4	Werkstoffgerechtes Konstruieren	407
5.3.5	Fertigungsgerechtes Konstruieren	418
5.3.6	Beanspruchungsgerechtes Konstruieren	421
5.3.6.1	Dimensionierung gegen eine zulässige Spannung	424
5.3.6.2	Dimensionierung gegen eine kritische Dehnung	426
5.3.6.3	Dimensionierung gegen den Zeiteinfluss – Lebensdauervorhersage	429
5.3.7	Kurzzusammenfassung der kunststoffgerechten Konstruktion	432
5.4	Nutzen von Prototypen in der Produktentwicklung	434
5.4.1	Rapid Prototyping	434
5.4.1.1	Stereolithographie (SLA)	435
5.4.1.2	Selektives Lasersintern (SLS)	437
5.4.1.3	Laminated Object Manufacturing (LOM)	437
5.4.1.4	3D-Printing (3D-P)	438
5.4.1.5	Strangablegeverfahren (FDM oder FFF)	439
5.4.2	Rapid Tooling	441
5.4.2.1	Gießverfahren	442
5.4.2.2	Lasersintern von Werkzeugen	445
5.4.3	Wahl eines Prototypverfahrens	446
5.4.3.1	Anforderungen an den Prototyp	446
5.4.3.2	Protoypen für großflächige Produkte und für gehäuseartige Produkte	447
5.4.3.3	Protoypen für behälterartige Produkte	449
5.4.3.4	Protoypen für komplexe Produkte	450
5.5	Literaturverzeichnis	451
6	Kunststoffe und Umwelt	453
6.1	Kunststoffabfälle	453
6.2	Sind Kunststoffe giftig?	459
6.3	Biopolymere und Biokunststoffe	463

6.3.1	Bioabbaubare Kunststoffe	464
6.3.2	Biobasierte Kunststoffe	468
6.3.3	Von Biopolymer zu Biokunststoff – Aufbereitung von Biopolymeren	473
6.4	Ressourcenschonung mit Kunststoffen	475
6.4.1	Herkunft des Begriffes der „Nachhaltigkeit“	475
6.4.2	Der Brundtland-Bericht und das Kyoto-Protokoll	475
6.4.3	Ressourcenschonung mit Kunststoffen	478
6.4.4	Regenerative Energieerzeugung mit Kunststoffen	483
6.5	Fazit	486
6.6	Literaturverzeichnis	487
A	Anhang: Empfehlungen zur Abfassung einer Bachelor-/Masterarbeit am IKT	489
A.1	Unterschiedlicher Anspruch an eine Bachelor-, Master- und Doktorarbeit	489
A.2	Wissenschaftliche Methoden	490
A.2.1	Quellen-untersuchende Methoden	490
A.2.2	Theoretische Methoden	490
A.2.3	Empirische Methoden	491
A.3	Wissenschaftliche Arbeit	492
A.4	Bachelor- oder Masterarbeit	493
A.4.1	Zum Titel der Abschlussarbeit	493
A.4.2	Zum Inhalt der Arbeit	493
A.4.2.1	Zusammenfassung	494
A.4.2.2	Einleitung	494
A.4.2.3	Hauptteil	494
A.4.2.4	Schlussbemerkungen	496
A.4.2.5	Anhang	496
A.4.3	Zum Umfang der Arbeit	496
A.4.4	Zum Schreibstil der Arbeit	496
	Index	499

1

Einleitung

„An was denken Sie, wenn Sie das Wort ‚Kunststoff‘ hören?“ ist oft die erste Frage an meine Stuttgarter Studierende. Interessanterweise denken sie meist zunächst an Einsatzgebiete (Leichtbau, Automobil, Flugzeuge, aber auch Verpackungen und Wärmedämmung), dann an die Unterteilung in Thermoplaste, Elastomere und Duromere, die sie vielleicht aus der Schule in Erinnerung haben. Manchmal fallen ihnen noch Begriffe zur Verarbeitung wie Spritzgießen oder Extrusion ein und immer öfter kommen wieder die Themen Weichmacher, Recycling und Umweltverschmutzung auf.

Kunststoffe scheinen bereits ein so fester Bestandteil des Alltags zu sein, dass jeder Studierende damit etwas Nützliches verbindet und darauf nicht zwangsläufig ein Billig-Image lastet. In dieser Einleitung soll zunächst ein Blick in die junge Geschichte der Kunststoffe und die aktuellen Einsatzgebiete geworfen werden, bevor die besondere Bedeutung der Kunststoffe für designgeprägte Produkte dargestellt wird.

■ 1.1 Kunststoff – Werkstoff der Moderne

Die Erde ist vermutlich 4,54 Milliarden Jahre alt, Pflanzen (Flora) entstanden erst vor 540 Mio. Jahren, Pilze, Flechten und erste Tiere (Fauna) etwa vor 440 Mio. Jahren. Der Homo sapiens sapiens, also der intelligente, moderne Mensch, existiert seit etwa 40 000 Jahren und in diesem – weltgeschichtlich gesehen – kurzen Zeitraum hat er Erstaunliches geschaffen.

Während seine Vettern und Basen, die Menschenaffen, in der Steinzeit verharrten, also gefundene Steine bearbeiten und als Werkzeug benutzen, erfand der moderne Mensch immerhin den Werkstoff Glas, welches bereits 4000 Jahre v. Chr. in Ägypten bekannt war.

Auf die Kupfersteinzeit, die letzte Phase der Steinzeit, folgte die Bronzezeit (Bild 1.1). Mit Bronze bezeichnet man Legierungen, die mindestens zu 60 % aus Kupfer

bestehen und Zinn beinhalten. Bronze gilt damit als erste, gezielt von Menschen erstellte und genutzte Legierung, eine Leistung, die bereits metallurgische Kenntnisse voraussetzte. Abgelöst wurde die Bronzezeit schließlich allmählich von der frühen Eisenzeit (Hallstattzeit). Eisen und seine Legierungen erfordern noch mehr metallurgische Kenntnisse und höhere Temperaturen, welche schließlich noch überlegene Waffen und Werkzeuge wie z. B. die der Römer ermöglichten.

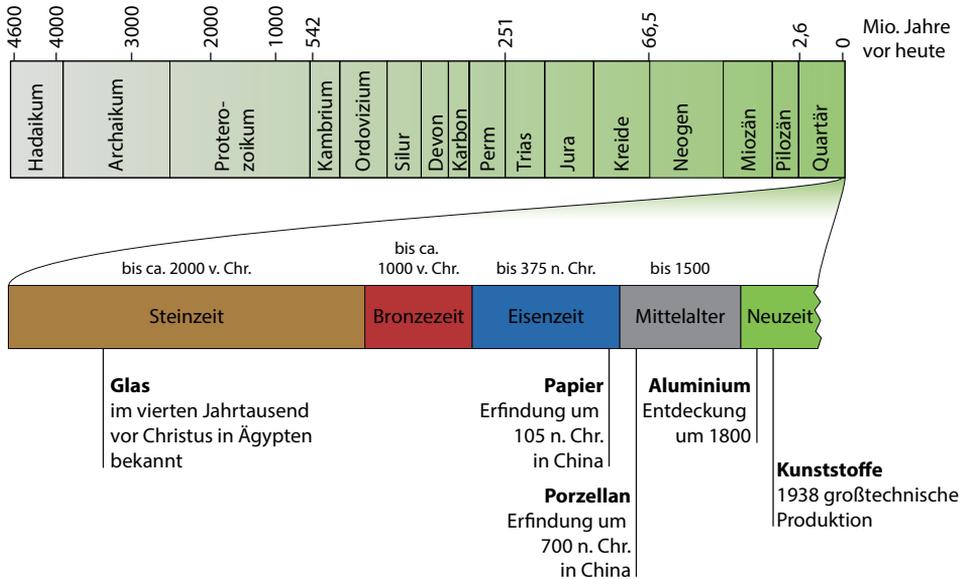


Bild 1.1 Zeitliche Abfolge verschiedener entwickelter Werkstoffe in der menschlichen Entwicklung

Über 1000 Jahre lang gab es dann in der „bekannteren“ Welt eigentlich keinen neuen Werkstoff. Erst Anfang des 18. Jahrhunderts wurde durch J.F. Böttger und E.W. von Tschirnhaus das europäische Porzellan möglich (welches in China bereits rund 1000 Jahre existierte). Anfang des 19. Jahrhunderts wurde Aluminium erfunden und Mitte des 19. Jahrhunderts dann die frühen Kunststoffe (ab Mitte des 20. Jahrhunderts allerdings erst großtechnisch umgesetzt).

Wegen des starken und zunehmenden Einsatzes von Kunststoffen gibt es Historiker, die bereits jetzt von der „Kunststoffzeit“ sprechen. Erstmals überstieg 1983 der weltweite Verbrauch von Kunststoff mit 125 000 000 m³ den von Eisen [1]. In der Geschichte der Kunststoffe werden nach Waentig vier Epochen unterschieden [2]:

- Ursprünge (bis 1839),
- Epoche der Imitationsstoffe (1839 bis 1914),
- Epoche der Ersatzstoffe (ab ca. 1914 bis ca. 1950),
- Epoche der Werkstoffe mit neuen Eigenschaften (ab ca. 1950).

Epoche der Imitationsstoffe

Am Anfang der Geschichte der Kunststoffe stand ein ökologisches Problem, das uns auch heute nicht fremd ist. Aufgrund der starken Nachfrage nach Elfenbein für Kugeln des in den USA beliebt gewordenen Billardspiels standen die Elefanten in Ceylon, dem heutigen Sri Lanka, schon in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts kurz vor dem Aussterben.

Einem amerikanischen Tüftler, J. W. Hyatt, gelang 1867 die Synthese eines Ersatzstoffes, des Celluloid. Aber Celluloid war nicht nur reizvoll für Billardkugeln, sondern auch für die preisgünstige Nachahmung von Luxusprodukten aus Elfenbein, Schildpatt, Perlmutter oder Horn für alle möglichen Gegenstände des Alltags (Bild 1.2). Eine noch epochalere Bedeutung kommt der Erfindung von G. Eastman, dem Chef des Kodak-Konzerns, zu, der 1884 den fotografischen Film patentieren ließ: dünne Streifen aus Celluloid als Träger für eine lichtempfindliche Schicht [1].



Bild 1.2 Celluloid, Ersatz für teure Naturwerkstoffe [Bildquelle: Deutsches Kunststoffmuseum]

Ähnlich war es bei der Entwicklung des Bakelit[®], des ersten vollsynthetischen Kunststoffs auf Phenolharzbasis, durch den Belgier Leo Hendrik Baekeland zu Beginn des 20. Jahrhunderts. Der wärmeformbeständige, elektrisch isolierende und leichte Werkstoff war für die noch junge Elektrotechnik ideal für den Einsatz als Gehäusewerkstoff von Radios und Telefonen (Bild 1.3) und für noch komplexere Geometrien von Schaltern und Lampenfassungen (Bild 1.4). Elektrische Geräte verbreiteten sich zu dieser Zeit rasend schnell.

Epoche der Ersatzstoffe

Noch vor dem 1. Weltkrieg unternahm Fritz Klatte die ersten Schritte zur industriellen Produktion eines der wichtigsten Massenkunststoffe des 20. Jahrhunderts: Polyvinylchlorid (PVC), welches vom Franzosen Henri Victor Regnault erfunden wurde, aber bis dahin nicht in großen Mengen produziert werden konnte.

**Bild 1.3**

Fernsprecher-Gehäuse aus Bakelit
[Bildquelle: Deutsches Kunststoffmuseum]

**Bild 1.4**

Klingelknopf zum Rufen von Hausangestellten
[Bildquelle: Deutsches Kunststoffmuseum]

Die mechanischen Eigenschaften und die Beständigkeit dieses Werkstoffs gegenüber Chemikalien und Umwelteinflüssen sowie seine preisgünstige Herstellung machten ihn universell einsetzbar: Von säureresistenten Arbeitsschutzhandschuhen bis hin zu Taschen und Koffern aus Kunstleder. Die Schallplatte aus dem sogenannten Vinyl ersetzte jene aus Schellack, einem Sekret von speziellen Läusen, und drehte sich bis weit in die 1980er Jahre auf jedem Plattenteller [1].

Epoche der Werkstoffe mit neuen Eigenschaften

Auch vor dem 1. Weltkrieg waren diese Pioniere oft nur auf Empirie, also auf Idee und Experiment, angewiesen, um neue Erfindungen auf dem Gebiet der Kunststoffe zu machen. Dies änderte sich, als der Freiburger Professor Hermann Staudinger 1922 durch seine Theorie der Makromoleküle die Vorgänge bei der Bildung von Polymeren und Kunststoffen erklärbar machte (Nobelpreis 1953).

Es ist daher nicht verwunderlich, dass in den 1930er Jahren zahlreiche neue Stoffe entwickelt wurden: Polymethylmethacrylat (PMMA; „Plexiglas®“) von Röhm, Polystyrol® (PS) von BASF (heute Styrolution), Polyethylen (PE) von Imperial Chemical Industries (heute Akzo Nobel) und die Polyamid (PA), Nylon® von DuPont und Perlon® von dem Stuttgarter Chemiker Paul Schlack [1].

Nach einer Stagnation während des 2. Weltkriegs war der Siegeszug der Kunststoffe nicht mehr aufzuhalten. Schon gegen Ende der 1930er Jahre hatte Otto Bayer

das Polyurethan entwickelt. In den 1950er Jahren gab es zahlreiche Anwendungsmöglichkeiten von Weich- und Hartschäumen aus Polyurethan (PUR), meist Polstermöbel und Sportartikel.

Im Jahr 1949 erschuf Fritz Stastny von der BASF durch sein Verfahren, Polystyrol aufzuschäumen, mit expandiertem Polystyrol (EPS; Styropor®) einen sehr leichten Werkstoff. Es wurde sofort für die stoßabsorbierende Verpackung von empfindlichen Gütern und zur Wärmedämmung eingesetzt. Karl Ziegler ließ 1953 ein gefahrloses und preisgünstiges Verfahren zur Herstellung von Polyethylen (PE) patentieren, das diesen Kunststoff erst richtig marktfähig machte (Nobelpreis 1963 gemeinsam mit Giulio Natta). Bis heute gehört es mit dem Polypropylen (PP) zu den am meisten verbreiteten Werkstoffen [1].

Hermann Schnell bei Bayer gelang 1953 die Synthese des Polycarbonats (PC). Es verbindet Transparenz mit sehr guten mechanischen Eigenschaften. Der Werkstoff wird geschätzt als Alternative für Glas in der Bauindustrie und als Gehäuse für Elektrogeräte, meist auch gemischt mit ABS. Splitterfeste Scheinwerfer-Streuscheiben aus Polycarbonat sorgen heute für mehr Sicherheit und weniger Gewicht im Auto. Ab ca. 1982 wurde es massenhaft für die Herstellung optischer Datenträger eingesetzt. Die Compact Disc (CD) verdrängte die bewährte Schallplatte aus PVC fast vollständig, es folgten DVD und Blu-Ray-Disc [1]. Diese werden heute allerdings durch Solid State Discs (SSD) verdrängt, die wenig Kunststoff beinhalten.

■ 1.2 Einsatzgebiete von Kunststoffen

Für den Personentransport werden Kunststoffe immer häufiger eingesetzt, weil sie mit ihren geringen Massenkräften auch die Massenträgheit reduzieren (sogenannter Leichtbau, obwohl Trägheit nicht gleich Gewicht ist). Wird die Massenträgheit reduziert, erlaubt vorhandene Motorleistung sportlichere Fahrweisen oder es können Motorleistung und damit auch der Ressourceneinsatz reduziert werden.

Das Bild 1.5 zeigt ausgewählte Beispiele von Fahr- und Flugzeugen, deren Kunststoffanteil immer größer wird. Z. B. unten rechts ist die Baureihe A 350 von Airbus gezeigt, die inzwischen aus über 50 M.-% kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen besteht.



Bild 1.5 Anwendung von Kunststoffen im Personentransport [Bildquellen: Deutsche Bahn AG/ Pablo Castagnola, BMW Group, Honda Motor Ltd., Airbus AG]

Das größte Einsatzgebiet für Kunststoffe sind die leichten Lebensmittelverpackungen, in Bild 1.6 dargestellt am Beispiel von Folien und Kunststoffflaschen. Für viele Menschen ist nicht auf den ersten Blick erkennbar, welche Leistungen von Verpackungen erbracht werden. Bei genauerem Hinschauen wird deutlich, dass Verpackungen aus Kunststoff mit minimalsten Einsatzmengen einen „Schirm“ über das zu schützende Gut entfalten, dessen stoffliche oder energetische Effizienz durch andere Verpackungsmaterialien nicht erreicht werden kann. Wir kommen in Abschnitt 6.3 noch näher darauf zu sprechen.



Bild 1.6 Verpackungen aus Kunststoff

Am Beispiel des europäischen Kunststoffverbrauchs wird in Bild 1.7 gezeigt, dass Verpackungen ein sehr wichtiges Einsatzgebiet von Kunststoffen sind, gefolgt vom Einsatz im Bauwesen, z. B. als Dämmmaterial, für Rohrleitungen oder als wärmedämmende Fensterrahmen. Danach erst folgen Fahrzeuge und Elektrotechnikanwendungen.

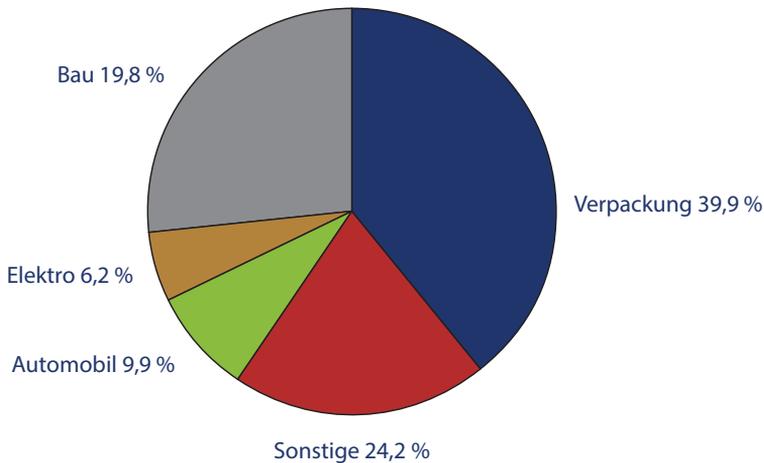


Bild 1.7 Kunststoffeinsatz in Europa 2018 [3]

Besonders auffällig ist, dass Verpackungen eher kurzlebige Anwendungen von Kunststoffen sind, hingegen Anwendungen im Baubereich am besten 50 Jahre oder länger halten sollen. Hier bemerkt man bereits das Dilemma, unter welchem diese Werkstoffklasse leidet. Zum einen soll das Produkt möglichst schnell nach Gebrauch wieder verschwinden (Verpackung), zum anderen soll es so lange wie möglich gebrauchstauglich sein (Bauwesen).

Unter „Sonstige“ versteht man z. B. die Einsatzgebiete: Sport und Freizeit (Bild 1.8), Möbel, Spielzeuge und Medizintechnik. Es wird deutlich, dass es eigentlich keine Branche gibt, in der Kunststoffe nicht eingesetzt werden!



Bild 1.8 Anwendungen im Sportbereich

■ 1.3 Kunststoffe und Design

Viele konsumnahe Produkte nutzen Design als Alleinstellungsmerkmal (z.B. Apple®, Loewe®, aber auch z.B. Gardena® und Rimowa®). In einigen Fällen kann über die Technik und Qualität allein keine deutliche Differenzierung mehr gegenüber dem Wettbewerb geschehen. Kunststoffe sind das „Chamäleon der Werkstoffe“ und daher ein von Designern gern genutzter Werkstoff. Mit den frühen Kunststoffen war es möglich, kostbare Naturstoffe wie Horn, Schildpatt, Perlmutter und Elfenbein zu imitieren (s. o.), und auch mit modernen Kunststoffen ist es möglich, viele andere hochwertige Werkstoffe optisch und teils auch haptisch zu imitieren und hieraus kostengünstig Produkte herzustellen.

Was Kunststoffbauteile außerdem so attraktiv macht, ist nicht nur das geringere Gewicht, sondern auch die meist geringeren Bauteilkosten. Die kostengünstige und ressourcenschonende Urformung, die wir in Kapitel 4 „Verarbeitungstechnik“ noch kennenlernen werden, erlaubt eine hohe Formgebungsvielfalt und dadurch Gestaltungsfreiheit (siehe auch Kapitel 5 „Produktentwicklung“). Beides ist besonders attraktiv für Ingenieure und Industriedesigner.

Der Aspekt „kostengünstig“ hat sicherlich dazu geführt, dass auf Kunststoffen lange Zeit ein Billig-Image gegenüber anderen Werkstoffen haftete und sich das – eigentlich falsche – Wort „Plastik“ einbürgerte. Heute werden Kunststoffprodukte zunehmend zu hochwertigen Designprodukten verarbeitet, ohne ihre werkstoffliche Identität zu verlieren. Kunststoffe sind immer weniger Ersatzstoffe für andere Werkstoffe, als ein bislang „nicht existenter Innovationsstoff“ [4].

Die Formgebung eines Fahrzeuginnenraums, die aufeinander abgestimmte Farbgebung, die Haptik und Akustik sind ein Erlebnis, welches kaum ein „billig“ assoziieren lässt (Bild 1.9): Hier ist so ziemlich alles aus Kunststoff.



Bild 1.9 Hochwertiger Fahrzeuginnenraum aus verschiedenen Kunststoffen
[Bildquelle: BMW Group]

Designer mögen besonders, dass Kunststoffe sich einfärben lassen (Bild 1.10), was mit kaum einem anderen Werkstoff möglich ist. Brotdosen, Kugelschreiber, Duschgelflaschen und viele andere Kunststoffprodukte gibt es in vielfältigen Farben und Farbkombinationen.

Mit der Einfärbung kann zum einen der teurere Lackierschritt eingespart werden, zum anderen behält das Bauteil seine Farbe, auch wenn die Oberfläche beschädigt wird. Dies ist ein Vorteil, den z.B. japanische Motorradhersteller nutzen und von lackierten Blechteilen – wo es technisch geht – zu UV-stabil eingefärbten Kunststoffbauteilen hinüberwechseln. Es ergeben sich nicht nur die o.g. ästhetischen Vorteile nach Kratzern, sondern auch ein weit geringeres Bauteilgewicht bei geringeren Herstellkosten.