

# HANSER



## Leseprobe

zu

## „Kunststofftechnik“

von Christian Bonten

Print-ISBN: 978-3-446-46471-1  
E-Book-ISBN: 978-3-446-46538-1

Weitere Informationen und Bestellungen unter  
<http://www.hanser-fachbuch.de/978-3-446-46471-1>

sowie im Buchhandel

© Carl Hanser Verlag, München

# 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

<b>Vorwort</b> .....	<b>V</b>
Vorwort zur 3. Auflage .....	V
Vorwort zur 1. Auflage .....	VI
<b>Der Autor: Prof. Christian Bonten</b> .....	<b>IX</b>
<b>Hinweise zur Benutzung des Buches</b> .....	<b>XI</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>1</b>
1.1 Kunststoff – Werkstoff der Moderne .....	1
1.2 Einsatzgebiete von Kunststoffen .....	5
1.3 Kunststoffe und Design .....	8
1.4 Literaturverzeichnis .....	11
<b>2 Grundlagen</b> .....	<b>13</b>
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 Innermolekulare 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
<b>3</b>	<b>Kunststoff-Werkstofftechnik .....</b>	<b>67</b>
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 $\rho$ .....	132
3.2.3.4	Wärmeleitfähigkeit $\lambda$ .....	133
3.2.3.5	Wärmeausdehnungskoeffizient $\alpha$ .....	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
<b>4</b>	<b>Kunststoff-Verarbeitungstechnik .....</b>	<b>263</b>
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
<b>5</b>	<b>Produktentwicklung mit Kunststoffen</b>	<b>383</b>
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
<b>6</b>	<b>Kunststoffe und Umwelt</b>	<b>453</b>
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
<b>A</b>	<b>Anhang: Empfehlungen zur Abfassung einer Bachelor-/Masterarbeit am IKT .....</b>	<b>489</b>
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
	<b>Index .....</b>	<b>499</b>

# 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

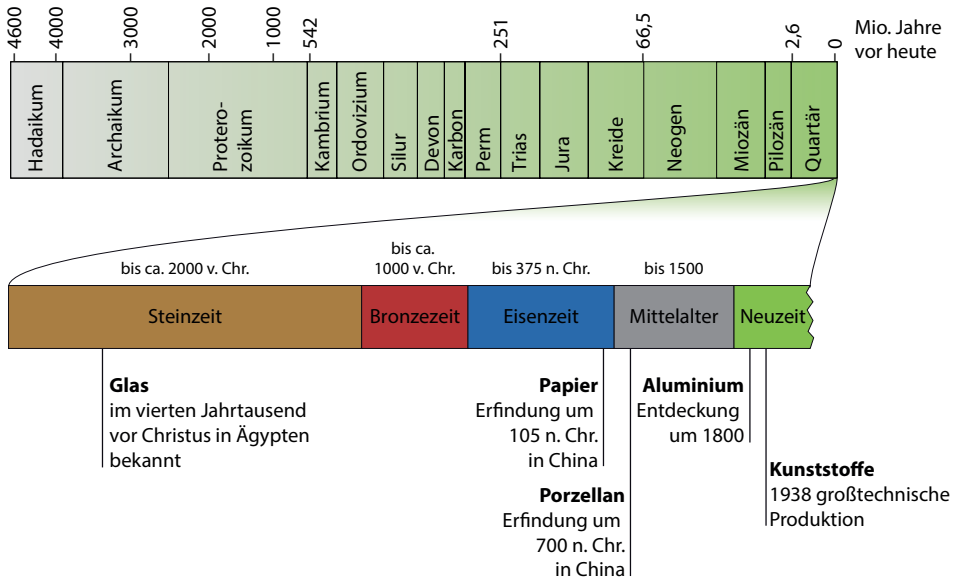
Die Erde ist vermutlich 4,54 Milliarden Jahre alt, Pflanzen (Flora) entstanden erst vor 540 Mio. Jahren, Pilze, Flechten und erste Tiere (Fauna) etwa vor 440 Mio. Jahren. Der Homo sapiens sapiens, also der intelligente, moderne Mensch, existiert seit etwa 40 000 Jahren und in diesem – weltgeschichtlich 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 m<sup>3</sup> 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<sup>®</sup>, 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.



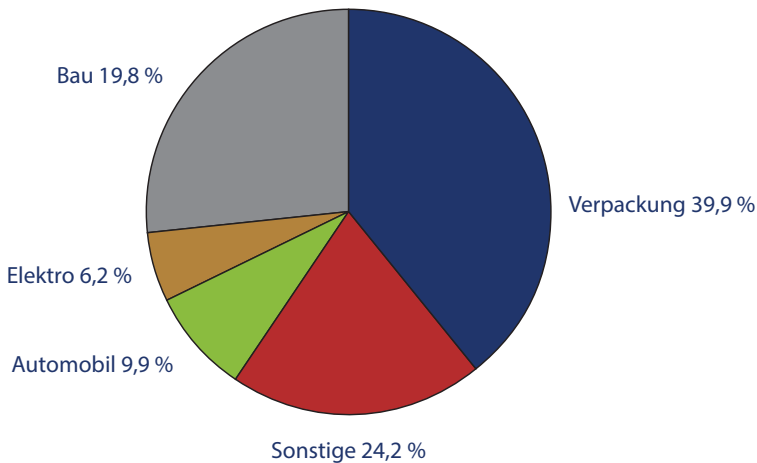
**Bild 1.5** Anwendung von Kunststoffen im Personentransport [Bildquellen: Deutsche Bahn AG/ Pablo Castagnola, BMW Group, Honda Motor Ltd., Airbus AG]

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.





**Bild 1.10** Alltagsbauteile mit verschiedenen Farben, Formen und Oberflächen

Die Formgebungsvielfalt inspirierte schon immer Designer und Künstler. In Bild 1.11 ist „La Chaise“ vom Ingenieur- und Künstlerpaar Charles und Ray Eames aus dem Jahre 1948 abgebildet, welches jahrzehntelang nur als Modell existierte und in Museen ausgestellt wurde. Anfang der 1990er Jahre traute sich der deutschschweizerische Möbelhersteller Vitra in dessen Serienfertigung mit modernen Werkstoffen zu investieren und bereut es heute sicherlich nicht.



**Bild 1.11**  
Ästhetische Form des „La Chaise“  
[Bildquelle: Vitra AG]

Das Bild 1.12 zeigt den weltberühmten Freischwinger-Stuhl des Dänen Verner Panton. Zunächst hat er ihn als Prototyp aus glasfaserverstärktem Kunststoff (GFK) manuell auf einer einseitigen Holzform gefertigt und seinen Freunden gezeigt. Deren Zuspruch ermutigte ihn zu einer Serienfertigung und er fand in der Vitra AG ein wagemutiges Unternehmen, welches ihn mit Unterstützung der Bayer AG aus Polyurethan verwirklichte (Abschnitt 4.3.4). Er musste nachträglich noch geschliffen, gespachtelt und lackiert werden. Der Stuhl fand dermaßen Anklang, dass in noch größeren Stückzahlen gedacht wurde und sich das Spritzgießverfahren (siehe Abschnitt 4.2) lohnte.

Es musste zwar viel Geld für die Spritzgießform investiert werden, jedoch war keine Nacharbeit mehr erforderlich, auch die Farbe war bereits im Werkstoff enthalten. Nun unterstützte die BASF mit ihrem UV-beständigen Acrylester-Styrol-Acrylnitril (ASA) die Realisierung. Ende der 90er Jahre – im Rahmen einer Retro-Welle – wurden die Stühle erneut aufgelegt, jetzt aber spritzgegossen aus langglasfaserverstärktem Polypropylen (PP-LGF) mit matter Oberfläche.



**Bild 1.12** Verschiedene Stadien des Panton-Stuhls [Bildquelle: Vitra AG]

## ■ 1.4 Literaturverzeichnis

- [1] N.N., „<http://www.deutsches-kunststoff-museum.de>“, 2014. [Online]. Available: <http://www.deutsches-kunststoff-museum.de/rund-um-kunststoff/zeittafel-zur-geschichte/>. [Zugriff am 08. April 2014].
- [2] F. Waentig, „Konservieren und Restaurieren von gealterten Kunststoffen,“ *Restaurator im Handwerk*, Nr. 2, 2013.
- [3] PlasticsEurope, „Plastics – the Facts 2019“ Brüssel, 2019.
- [4] G. Klein, „Design für Innovationsstoffe,“ *Kunststoffe*, Nr. 9, 2000.

# Index

## A

Abbindemechanismus  
– chemisch 365  
– physikalisch 365  
Abkühlgeschwindigkeit 46  
Abminderungsfaktor 426  
ABS 203, 218  
Absorption 119  
Abstaelement 174  
Acrylester-Styrol-Acrylnitril 11  
Acrylnitril 460  
Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymere 218.  
*Siehe* ABS  
Acrylnitril-Styrol-Acrylester-Copolymere 219.  
*Siehe* ASA  
Additive 49, 144, 162  
Adhäsion  
– mechanisch 366  
– spezifisch 366  
Alterung 36, 189, 386, 429  
– beschleunigte 430  
Alterungsmechanismus  
– chemischer 194  
– mechanischer 191  
– physikalischer 192  
Aluminium 2  
Angusssystem 297, 299  
Anisotropie 144, 151  
Antioxidantien 196, 461  
Arrhenius-Gleichung 431  
ASA 219  
Aufbereitung 67, 165, 171  
– von Biopolymeren 473  
Aufschmelzzone 265  
Ausarbeitungsphase 434  
Auslegung  
– mechanische 298, 421  
– rheologische 298, 330  
– thermische 298, 300  
Austragzone 265, 268, 272

## B

Baekeland, L.H. 3  
Bagley-Korrektur 91  
Bakelit 3  
Barriereschicht 143, 286, 455  
Barriereschnecke 273  
Barrierewirkung 372  
Bayer, O. 4  
Beanspruchung  
– dynamisch 386  
Belastung  
– dynamisch 386  
Benetzung 372  
Benzol 460  
Beschichten 49, 372, 376  
– hydrophil 373  
– hydrophob 373  
Biegeversuch 112  
Billig-Image 9  
Bindenaht 184, 355, 419  
Bindigkeit 29  
bioabbaubar 464, 469, 486  
biobasiert 468, 486  
Biokunststoff 463  
Biomasse 468  
Biosynthese 15  
Bisphenol A 461  
Blasfolienextrusion 276, 282  
Blaskopf 283  
Blend 19, 37, 165, 473  
Bohren 353  
Brechungsindex 120  
Breitschlitzdüse 276, 281  
Brennstoffzelle 485  
Brown'sche Molekularbewegung 33, 46, 54  
Brundtland-Bericht 476  
Burger-Modell 61

**C**

Caprolactam 152  
 CARPOW-Ansatz 81  
 Carreau-Ansatz 75  
 Celluloid 3  
 Cellulose 15  
 Cellulosederivate 246  
 CO<sub>2</sub>-Fußabdruck 481  
 CO<sub>2</sub>-Neutralität 469  
 Co-Extrusion 285  
 Computertomographie 159  
 Copolymer 19, 166  
 Craze 60

**D**

3D-Printing 438  
 Dämmung 126, 479  
 Dämpfer 59  
 de Gennes 73  
 Dehnfähigkeit 385  
 Dehnrheometer 97  
 Dehnung 51 f.  
 – Bruch- 52, 165  
 – kritische 428  
 – Randfaserdehnung 426  
 – Streck- 52  
 – zulässige 427  
 Delamination 156  
 Design 8  
 Desorption 140  
 Dichte 132, 326, 384  
 Differential Scanning Calorimetrie 130, 199  
 Diffusion 140  
 Dipol-Dipol-Kräfte 30  
 Dispersionskräfte 32  
 Doppelschneckenextruder 165, 172  
 – gegenläufig 172  
 – gleichläufig 172, 175  
 Drehen 353  
 Drehteller 312  
 Drei-Zonen-Schnecke 265, 293  
 Druckaufbauzone 177  
 Druckverlust 418  
 duktil 51  
 Durchschlagfestigkeit 115  
 Durchstrahlschweißen 363  
 Duromer 34, 57, 151, 321

**E**

Eigenschaften  
 – akustische 125

– elektrische 114, 387  
 – magnetische 117  
 – optische 118  
 – physikalische 114  
 Eigenspannung 136, 181 f., 355  
 eindimensionale Strömung 69  
 Einfallstellen 410  
 einfärben 9  
 Einlaufdruckverlust 91  
 Einschneckenextruder 264  
 Einspritzaggregat 293  
 Einspritzdüse  
 – offene 295  
 Einspritzeinheit 289  
 Einspritzphase 303  
 Ein-Stationen-Maschine 348  
 Einzugszone 175, 265  
 elastisch 58  
 Elastomer 34, 57, 321, 325  
 – thermoplastischer 37  
 Elektronengas 28  
 Elektrotechnik 3  
 E-Modul 58, 100, 152  
 Energie  
 – spezifische 177  
 Energieeffizienz 478  
 Energieerzeugung  
 – regenerative 483, 486  
 Entformungsschräge 420  
 Entformungssystem 297  
 Entgasungszone 175  
 Enthalpie  
 – spezifische 128  
 Entsorgungsweg 468  
 EP 253  
 EPDM 207  
 Epoxidharz 151  
 Epoxidharze 253. *Siehe* EP  
 Ersatzmodell  
 – mechanisches 58  
 Ethylen 14  
 Ethylen-Propylen-(Dien)-Copolymere 207.  
*Siehe* EPDM  
 Extruderschnecke 265  
 Extrusionsblasformen 284, 318

**F**

Faser 144  
 – Aramid- 150  
 – -bruch 156  
 – Chemie- 49  
 – Endlos 148, 332, 334, 336, 339

- Glas- 145, 150
- -halbzeug 149
- Kohlenstoff- 146, 150
- Kurz 148, 186, 332
- Lang 148, 332, 334
- Natur- 49, 150
- neutrale 54
- -verstärkung 151
- Faserkunststoffverbund 145, 331, 480, 483
  - dreidimensionale FKV-Strukturen 341
- Faserspritzen 332
- Faserwickeln 342
- Feder 58
- Feingießen 443
- Fernordnung 41, 45
- Festigkeit 50, 385
- Feststoffförderung 269
- Filmscharnier 369, 401, 422, 427
- Filtermodell 388
- Flächenträgheitsmoment 326, 404
- Flachfolienextrusion 281
- Flammschutzmittel 461
- Flanke
  - aktive 271
  - passive 271
- Flechten 341
- Fließaktivierungsenergie 78
- Fließgrenze 80
- Fließhilfsmittel 162
- Fließmarkierung 277
- Fließverhalten
  - Newton'sch 71
  - strukturviskos 71
- Fließweg 418
- Fluidinjektionstechnik 315
- Förderelement 174
- Förderzone 175
- Formaldehyd 460
- Formfräsen 352
- Fotovoltaik 484
- Fragmentierung 458, 466
- Fräsen 352
  - Formfräsen 352
  - Umfangsfräsen 352
- Freischwinger-Stuhl 11
- Fügen 369
- Füllbildsimulation 419
- Füllstoffe 36, 144, 170
  - organische 170
- Funktionselemente 399
- Fused Deposition Modeling 439
- Fused Filament Fabrication 439

## G

- Ganghöhe 266
- Gangsteigung 266
- Gangsteigungswinkel 266
- Geiger, K. 81
- Gelpermeationschromatographie 27
- Gestaltungsfreiheit 8, 399
- Glasübergang 55, 132
- Glattrohrextruder 266
- Global Warming Potential 481
- Glukose 15
- Goodyear, C. 36
- Granulierung 180
  - Heiß- 180
  - Kalt- 180
  - Nass- 180
  - Strang- 180
  - Trocken- 180
  - Unterwasser- 180
- Grünschloß, E. 273
- Guß-Polyamid 337

## H

- Haftvermittler 168
- Halbzeug 344
- Handlaminiieren 332
- Haptik 9
- Harnstoff-Formaldehydharz 257. *Siehe UF*
- Härter 322, 332
- Harz 322, 332
- Harzgießen 442
- Harzinjektionsverfahren 339, 342
- Harznest 156
- Hauptvalenzbindung 28
- Hautkomponente 313
- Heizelementsweißen 356
- Helibar® 273
- Henry'sches Gesetz 140
- Hinterschnitt 419
- Hinterspritztechnik 317
- Hochdruck-Kapillarrheometer 91
- hormonaktiv 461
- Hyatt, J. W. 3
- Hydrolyse 196

## I

- Induktionskräfte 32
- Infrarot-Spektroskopie 199
- Initiator 16
- Inline-Produktion 350
- Innovationsstoff 9

Insert 403  
 Integralschaum 328  
 Interferometrie 158  
 Isotropie 151

## K

Kaskadenspritzgießen 309  
 Katalysator 18, 36  
 Kautschuk 325  
 Kavität 291, 297, 311, 333  
 Keimbildner 167  
 Keltool 445  
 Keramikstrahler 346  
 Kerbeffekt 421  
 Kerbschlagzähigkeit 165  
 Kerbwirkung siehe Kerbeffekt 421  
 Kernkomponente 314  
 Kernschicht 187  
 Kettenwachstumsreaktion 17  
 Klatte, F. 3  
 Kleben 49  
 Kohäsion 364  
 Konfiguration 38  
 Konformation 39  
 Konstitution 38  
 Konstruieren  
 – beanspruchungsgerecht 421  
 – fertigungsgerecht 418  
 – werkstoffgerecht 407  
 Konstruktionstechnik 63  
 Konsumgüter 8  
 Kontraktion  
 – thermische 182  
 Konverter 360  
 Konzeptphase 434  
 Kratzfestigkeit 373  
 Kristallisation 42, 181, 187  
 Kristallisationsgrad 42  
 Kristallitschmelztemperatur 56, 132  
 Kugelgelenkverbindung 369  
 Kühlzeit 291, 356, 418  
 Kunststoff 9, 62  
 – Hochleistungs- 202  
 – Massen- 201  
 – technischer 201  
 Kunststoffabfälle 453, 455, 486  
 Kunststoffflaschen 6  
 Kunststoffstaub 457, 466  
 Kunststofftechnik 63  
 Kunststofftragetasche 482  
 Kunststoffverbrauch 7  
 Kyoto-Protokoll 476, 482

## L

La Chaise 10  
 Lamelle 47  
 Laminat 154  
 Laminated Object Manufacturing 437  
 Laserschweißen 363  
 Lasersintern 445  
 – selektives 437  
 Lastenheft 393  
 L/D-Verhältnis 178, 266  
 Lebensdauervorhersage 429  
 Lebensmittelverpackungen 6  
 Leckstrom 271  
 Leichtbau 5, 144, 480  
 Leitfähigkeit 372  
 Lichtschutzmittel 197, 461  
 Life Cycle Assessment 482  
 Lunker 280, 410

## M

Makromolekül 14, 30  
 Massedurchsatz 177  
 Massenanhäufung 303, 411  
 Material 67  
 Matrix 151  
 Maxwell-Modell 61  
 mechanische Bearbeitung 351  
 Mehrkopfanlage 360  
 Mehrstationen-Maschine 349  
 Melaminformaldehydharz 255. *Siehe* MF  
 Metallbindung 28  
 Metallspritzen 444  
 MF 255  
 migrationsfähig 460  
 Mikro-Formschluss 366  
 Mischelement 174  
 – dispersiv 272  
 – distributiv 272  
 Mischen  
 – dispersiv 160, 173  
 – distributiv 173  
 Mischungsregel 152  
 Mischzone 175  
 Molmasse 22, 163, 460  
 Molmassenverteilung 23, 79, 198  
 Monomer 13, 152  
 – Restmonomer 460  
 Montagespritzgießen 311, 313  
 Multi-Axial-Gelege 149

## N

Nachdruckphase 292, 305  
 Nahordnung 41  
 Nanopartikel 160  
 Nanoröhrchen 161  
 Naphta 14  
 Natta, G. 5, 19  
 Nebenvalenzbindung 30, 42  
 Negativformung 344  
 Nieten 371  
 Normalspannung 52  
 Nutbuchsenextruder 266

## O

Ökotoxizität 466  
 Oligomer 14  
 Ölpreis 470  
 Ondulation 156  
 Opazität 42, 121  
 Organoblech 317, 338  
 Orientierung 355  
 – Faserorientierung 149, 153, 186, 333, 409, 419  
 – Molekülorientierung 122, 181, 183, 409, 419  
 Outsert 403  
 Oxidation 195

## P

PA 222  
 PBT 228  
 PC 232  
 PE 205  
 PEEK 240  
 Perkolationschwelle 116  
 Permeation 140f.  
 Permeationsbarriere 374  
 Peroxide 37  
 PES 242  
 PET 203, 229, 462, 482  
 PF 256  
 PHA 248  
 Phenol-Formaldehyd. *Siehe* PF  
 Phenol-Formaldehydharz 256  
 Phenolharz 256. *Siehe* PF  
 Phtalate 461  
 PLA 249  
 Plastifizierzone 175  
 plastisch 60, 343  
 Plattenautomat 348  
 PMMA 203, 234  
 Polarisationsfilter 46

Polarität 367  
 Polieren 352  
 Polyaddition 21, 328  
 Polyamid 4, 203, 222. *Siehe* PA  
 Polybutylenterephthalat 228. *Siehe* PBT  
 Polycarbonat 5, 203, 232. *Siehe* PC  
 Polydispersität 24  
 Polyetheretherketon 240. *Siehe* PEEK  
 Polyethersulfon 242. *Siehe* PES  
 Polyethylen 4, 18, 203, 205. *Siehe* PE  
 Polyethylenterephthalat 229. *Siehe* PET  
 Polyhydroxyalkanoate 248. *Siehe* PHA  
 Polykondensation 20  
 Polylactid 249. *Siehe* PLA  
 Polymer 13, 63, 460  
 Polymerchemie 13  
 Polymermembran 485  
 Polymersynthese 16  
 – In-situ- 152  
 Polymethylmethacrylat 4, 234. *Siehe* PMMA  
 Polyolefin 203  
 Polyoxymethylen 236. *Siehe* POM  
 Polyphenylsulfid 244. *Siehe* PPS  
 Polypropylen 203, 206. *Siehe* PP  
 – langglasfaserverstärktes 11  
 Polystyrol 4, 18, 203, 212. *Siehe* PS  
 – expandiertes 5, 203, 479  
 Polysulfon 242. *Siehe* PSU  
 Polytetrafluorethylen 203, 239. *Siehe* PTFE  
 Polyurethan 5, 11, 21, 203, 252, 326, 479.  
*Siehe* TPE-U, TPU  
 Polyvinylchlorid 210. *Siehe* PVC  
 POM 236  
 Porzellan 2  
 Positivformung 346  
 Potenzansatz 74  
 PP 206  
 PPS 244  
 Prägespalt 308  
 Preform 339  
 Prepreg 338  
 Pressen 323, 333  
 Primärstruktur 38, 42  
 Produkte  
 – behälterartig 392, 449  
 – gehäuseartig 391, 447  
 – großflächig 390, 447  
 – komplex 392, 450  
 Produktentwicklung 383  
 Profilextrusion 277  
 Propylen 14  
 Prototyp 434  
 – Funktions- 446f., 450

- Geometrie- 446f., 449f.
- Konzeptmodell 446f., 449f.
- technischer 446, 448ff.
- PS 212
- PSU 242
- PTFE 239
- Pultrusion 336
- PUR 252
- PVC 3, 18, 163, 203, 210, 461

## Q

- quasi-isotrop 155

## R

- Radikal 16, 37
- Randschicht 187
- Rapid Prototyping 434
- Rapid Tooling 301, 441
- Rasterkraftmikroskop 166
- Reaction Injection Molding 330, 441
- Recycling 454
- Recyclingfähigkeit 375
- Reflexion 119
- Regnault, H. V. 3
- Reibeigenschaft 372
- Reibklotz 61
- Relaxation 109
- Reptationsmodell 73
- Resin Transfer Molding 339
- Ressourcenschonung 478, 486
- Retardation 108
- Rheologie 68
- Rheometer
  - Dehnrheometer 97
  - Hochdruck-Kapillarrheometer 91
  - Rotationsrheometer 92
- Rheometrie 88
- Ringschnappverbindung 369
- Rippe 404, 412
  - Rippenkreuzung 415
- Rohrextusion 276
- Rohstoffe
  - fossile 13, 456, 468
  - nachwachsende 15, 468
- Rollenautomat 350
- Roving 149
- Rückströmsperre 294

## S

- Sägen 351
- Sagging 163
- SAN 215
- Sandwich-Spritzgießen 313
- SBS 214
- Schaum 187, 308, 326
  - geschlossenzellig 188
  - offenzellig 188
- Schergeschwindigkeit 70
  - Übergangsschergeschwindigkeit 76
- Scherung 52, 184
- Schichtsilikat 161
- Schlack, P. 4
- Schlagbiegeversuch 112
- Schlagzähigkeit 113
- Schlagzähmodifizierer 165
- Schleifen 352
- Schließeinheit 290, 296
- Schmelzefilter 179
- Schmelzefront 184
- Schmelzeindex 89
- Schmelzekanal 274
- Schmelzemassefließrate 89
  - mechanisches 58
- Schnappverbindung 369, 400
- Schneckenpiel 266
- Schneckenorraum 293
- Schnell, H. 5
- SchnellzerreiBversuch 103
- Schraubdom 401, 416, 425
- Schraubverbindungen 370
- Schrumpf 88
- Schubmodul 92
- Schubspannung 52, 70
- Schweißen 354
- Schweißextruder 359
- Schweißzyklus 356
- Schwermetalle 466
- Schwindung 88, 182, 305, 409
- Schwingversuch 96, 109
- Sekundärstruktur 39
- Shearographie 158
- Sheet Molding Compound 333
- Sicherheitsfaktor 426
- Siebdruckverfahren 379
- Siegelzeit 292
- Sonotrode 360
- Sorption 140
- Spannung 51
  - Bruch- 52
  - zulässige 424
- Spannungs-Dehnungs-Diagramm 51



Spannungs-Dehnungskurve 101  
 Spannungsrisbildung 193  
 Speichermodul 92, 163  
 Sphärolith 45, 167  
 Spritzgießcompoundieren 310  
 Spritzgießen 11, 288, 325  
 Spritzgießmaschine 289  
 Spritzgieß-Sonderverfahren 306  
 Spritzgießzyklus 290  
 Spritzprägen 307  
 Spritzstreck-Blasformen 318  
 spröde 51  
 Stabilisator 196  
 – Bio- 197  
 Stärke 15  
 Stastny, F. 5  
 Stauchung 52  
 Staudinger, H. 4  
 Stegbreite 266  
 Stegdornhalter 277  
 Steifigkeit 50  
 Steiner'scher Anteil 404  
 Stereolithographie 435, 442  
 Strangablegeverfahren. *Siehe* Fused Filament  
 Depositon  
 Strangaufweitung 86, 278  
 Streckgrenze 52  
 Strömung  
 – laminare 302, 304  
 – turbulente 302  
 Stufenwachstumsreaktion 20  
 Styrol 460  
 Styrol-Acrylnitril-Copolymere 215. *Siehe* SAN  
 Styrol-Butadien-Styrol-Copolymere 214.  
*Siehe* SBS

## T

Taktizität 39  
 Tampondruckverfahren 378  
 Tapelegen 342  
 Tauchkantenwerkzeug 308, 324  
 teilkristallin 42  
 Temperaturleitfähigkeit 137  
 Temperaturverschiebung 77  
 Temperiermedium 302  
 Temperiersystem 300  
 – variotherm 320  
 Tempern 185, 199  
 Tertiärstruktur 39, 45  
 Textiltechnik 49  
 thermisches Langzeitdiagramm 431  
 thermoelastisch 55

Thermoformen 343  
 Thermographie 157  
 Thermoplast 34, 151  
 – amorph 41, 55, 389  
 – glasmattenverstärkt 336  
 – teilkristallin 42, 56, 389  
 thermoplastisch 55  
 Thermoplastisches Polyurethan 251. *Siehe* TPE-U,  
 TPU  
 Thermoplast-Pultrusion 337  
 Thermoplastschaum-Spritzgießen 308  
 Thermoplastspritzgießen 290  
 Toxizität 459, 486  
 TPE-U 251  
 TPU 251  
 Transferpressen 325  
 Transmission 119  
 Transmissions-Elektronenmikroskop 46  
 Transparenz 118  
 Treibhausgase 476  
 Treibmittel 189, 327

## U

Überlaufwerkzeug 324  
 UF 257  
 Ultraschall 159  
 Ultraschallschweißen 360  
 Umfangsfräsen 352  
 Umformen 343  
 Uneinheitlichkeit 24  
 Ungesättigtes Polyesterharz 258. *Siehe* UP  
 UP 258  
 Urformen 8, 55, 263

## V

Vakuum-Gießen 442  
 Valenzelektron 28 f.  
 Van-der-Waals-Kräfte 32  
 Variotherme Werkzeugtemperierung 320  
 – kovalente *siehe* Hauptvalenzbindung 28  
 VARI-Verfahren 340  
 Verarbeitung 67, 181, 386  
 Verarbeitungstechnik 63, 263  
 Verbindungsmoleküle 47  
 Verbundspritzgießen 311  
 Vergleichsspannung 424  
 Verlustfaktor 93, 96, 127, 360  
 Verlustmodul 93  
 Verner Panton 11  
 Vernetzung 35 f., 322, 328, 333  
 Vernetzungsdichte 35

Verschlussdüse 295  
Versprödung 197  
Verstärkungsstoffe 144  
Verstoffwechslung 464  
Verstreckgrad 347  
Verweilzeit  
– mittlere 178  
Verwertung  
– energetische 455, 469  
– stoffliche 455  
Verzug 407  
– Winkelverzug 407  
Vibrationsreißschweißen  
– biaxial 362  
– linear 362  
Viskosimeter siehe Rheometer  
– Ubbelohde- 26  
Viskoelastizität 61, 86  
viskos 59  
Viskosität 55, 152, 163  
– Dehn- 85  
– Null- 74, 76  
– repräsentative 81  
– scheinbare 82  
– Scher- 70  
– Struktur- 71, 304  
– wahre 82  
Volumen  
– freies 142  
– spezifisches 132  
Vorformling 318  
Vorstrecken 347  
Vorstreckstempel 344  
Vulkanisation 36, 325

## W

Waentig, F. 2  
Wanddickenverteilung 345  
Wandhaftung 69  
Wärmeausdehnung 136, 386  
Wärmeeindringzahl 139  
Wärmekapazität  
– spezifische 129, 387  
Wärmeleitfähigkeit 133, 387  
Wärmeübertragung 355  
Warmgas-Fächelschweißen 358  
Wasserstoffbrückenbindung 31  
Weichmacher 163, 461  
Werkstoff 67  
Werkstofftechnik , 63  
Werkstoffvorauswahl 388  
Werkzeug 263  
– Extrusions- 172, 264  
– offenes 346  
– Spritzgieß- 296  
Werkzeugdruck 270  
Werkzeugwiderstand 270  
Widerstand, elektrischer 114  
Wiederholungseinheit 18

## Z

Zähigkeit 50 ff.  
Zeitstandversuch 104  
Zeit-Temperatur-Verschiebungsprinzip 107, 431  
Zersetzungstemperatur 56  
Ziegler, K. 5, 19  
Zugfestigkeit 52, 385  
Zugversuch 100  
Zusatzstoffe 178, 460  
Zwangsentformung 420  
Zwangsförderung 270  
Zwischenfaserbruch 156  
Zykluszeit 303, 356