

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.

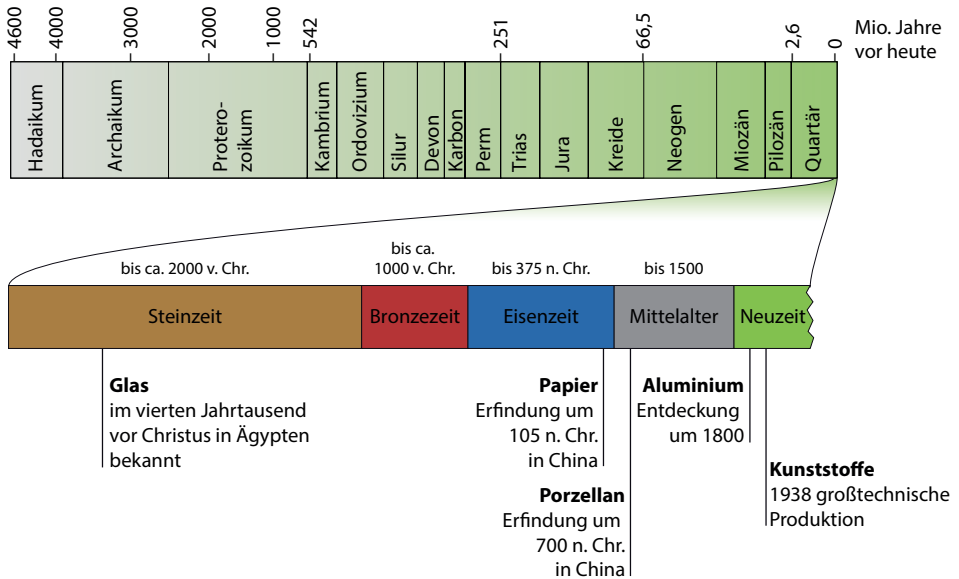


Bild 1.1 Zeitliche Abfolge verschiedener entwickelter Werkstoffe in der menschlichen Entwicklung

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.

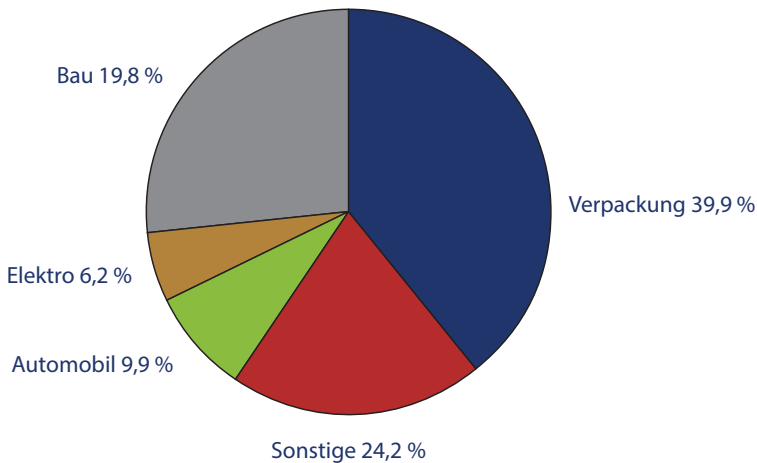


Bild 1.7 Kunststoffeinsatz in Europa 2018 [3]

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.



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
 CO₂-Fußabdruck 481
 CO₂-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
- Grüenschloß, 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

Lebensdauer vorhersage 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
 Spannungsrisssbildung 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
 Wärmeindringzahl 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