

1 Einführung

*Alles Wissen stammt aus der Erfahrung.
Immanuel Kant*

1.1 Werkstoffklassen

Als Werkstoffe werden alle festen Materialien wie Holz, Stahl, NE-Metalle, Leder, Steine, Glas, Keramik, Kunststoffe bezeichnet, die sich zur Herstellung von Werkstücken, beispielsweise Maschinenteilen und Gebrauchsgegenständen eignen.

Eine Einteilung der Werkstoffe nach den Kriterien anorganisch, organisch, natürlich und synthetisch zeigt Bild 1.1. Wie dieser Darstellung zu entnehmen ist, zählen außer den Kunststoffen auch die technisch genutzten Metalle sowie Glas und Keramik zu den synthetischen Werkstoffen. Die Herstellung dieser Materialien wird demnach maßgeblich durch synthetische, d. h. durch chemisch-technische Prozesse bestimmt (z. B. Redox-Reaktionen zur Entfernung des Sauerstoffs aus den Erzen). Aluminium und Stahl sind demzufolge als synthetisch-anorganische Werkstoffe zu definieren, Kunststoffe entsprechend als synthetisch-organische Werkstoffe. Eine andere Definition für Kunststoffe geht davon aus, dass diese Materialien in irgendeiner Phase ihrer Verarbeitung plastische Zustände durchlaufen (griechisch: plastikos, formen/formbar). Von diesem Merkmal eines plastischen Zustands leitet sich in den meisten anderen Sprachen der Name für die im Deutschen als Kunststoffe bezeichneten Werkstoffe ab, beispielsweise *plastics* (engl.); *matières plastiques* (franz.); *materie plastiche* (ital.); *plastico* (span.).

synthetisch-
organische
Werkstoffe

plastics

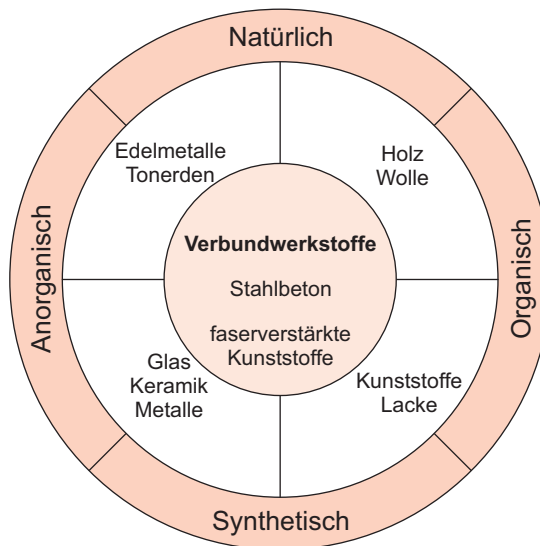


Bild 1.1: Werkstoffklassen (schematisch)

1.1.1 Werkstoffauswahl bei Kunststoffen

Die Eignung als Werkstoff wird in der Praxis für alle Werkstoffklassen vor allem durch ihr Eigenschaftsspektrum bestimmt. In Bild 1.2 sind beispielhaft einige Eigenschaftsgruppen zusammengestellt, die als Auswahlkriterien bei der Suche nach einem geeigneten Werkstoff eine zentrale Rolle spielen. Dazu kommen weitere Überlegungen, z. B. ökonomischer und ökologischer Art oder bezüglich der Gesetzgebung. Nur in den seltensten Fällen wird es daher gelingen den anvisierten „Ideal-Werkstoff“ zu finden. Wie an praktischen Beispielen leicht zu erkennen ist, müssen demzufolge sehr oft Kompromisse bei der Wahl eines Werkstoffs eingegangen werden. Auch hier gilt eben die goldene Regel: „Nur so gut wie nötig, nicht so gut wie möglich“.

„Nur so gut wie nötig, nicht so gut wie möglich.“

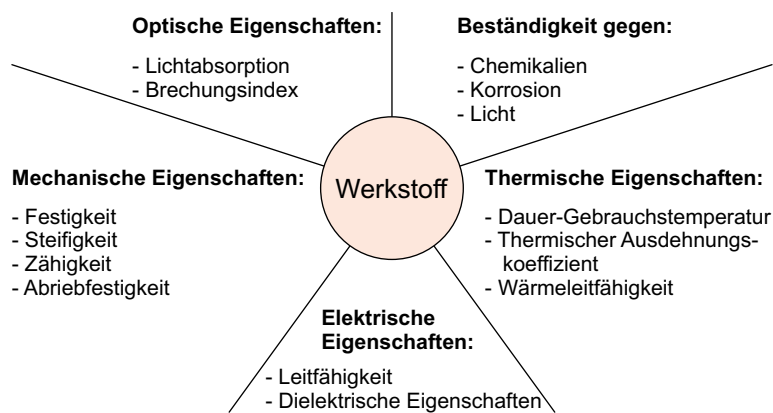


Bild 1.2: Eigenschaftsspektrum von Werkstoffen (Auswahl)

Indes erfordern die Besonderheiten, die bei der Werkstoffauswahl von Kunststoffen auftreten, nebst dem bisher Gesagten das Hauptaugenmerk vorrangig auf die thermischen Eigenschaften sowie auf die physikalisch/chemische Beständigkeit gegen Einflüsse von außen zu lenken. Nicht umsonst trägt die größte Gruppe innerhalb der Kunststoffe die Bezeichnung *Thermoplaste*. Eine ebenso wichtige Erkenntnis beruht auf der Tatsache, dass die Eigenschaften einer Kunststoff-Formmasse nur einen Teil der Güte eines Bauteils oder Halbzeugs aus Kunststoff bestimmen. Die Erklärung dazu liefert der *Hauptsatz der Kunststofftechnik*, vgl. Abschnitt 2.5.3. Dahinter verbirgt sich die Komplexität, im gegenseitig voneinander abhängigen Zusammenspiel zwischen Eigenschaften, Konstruktion/Gestaltung und Verarbeitung zum Bauteil bzw. Halbzeug.

Bild 1.3 zeigt zu diesem Zweck in einer Übersicht den schematischen Ablauf bis zur endgültigen Werkstoffauswahl in Kombination mit einer kunststoffgerechten Konstruktion/Gestaltung (inkl. Werkzeug), z. B. eines spritzgegossenen Formteils („Spritzling“).

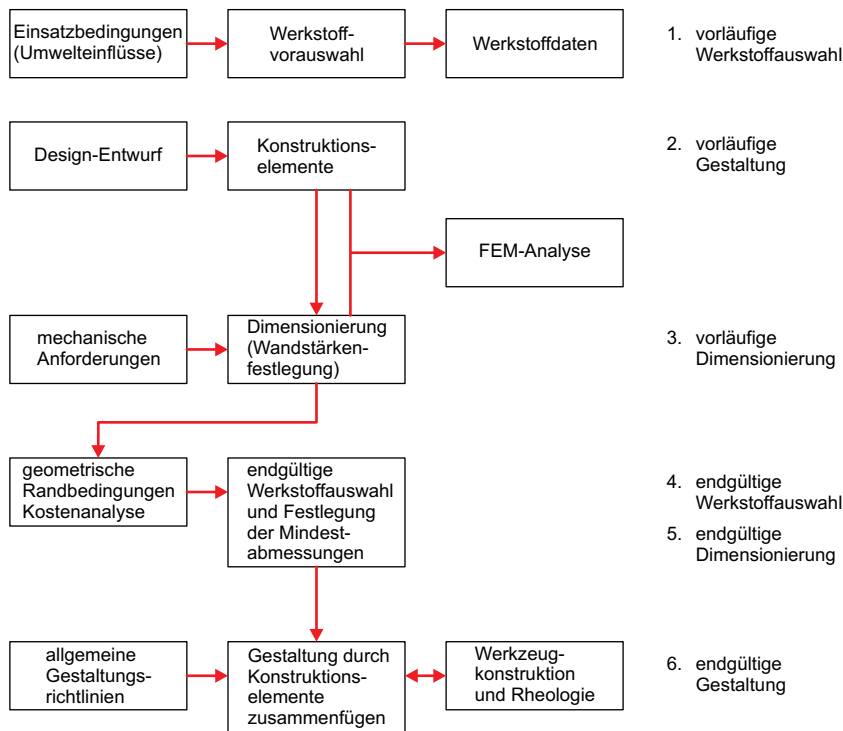


Bild 1.3: Vorgehensweise bei der Werkstoffauswahl eines spritzgegossenen Formteils
Quelle: VDI-K

1.1.2 Internationale Vereinbarungen/Normen – die geheimen Helfer

Wie im Abschnitt *Hinweise zur Benutzung des Buches* bereits erwähnt (Seite XI bis XV), findet sich eine Auflistung der wichtigsten Normen für einen Kunststofftyp jeweils am Anfang des betreffenden Kapitels, vgl. Kapitel 4 bis 15. Geht es um die aktuellen Normen für das Recycling von Kunststoffen sei auf Kapitel 17 verwiesen.

Überdies besteht für viele Bereiche der Technik (Automobilbranche, Bahnwesen, Elektrogeräte, Luftfahrt u. a.) die Möglichkeit sich vor der Werkstoffauswahl und/oder der Bewertung (Evaluation) eines Kunststoffs anhand bereits existierender Materialdatenblätter (Material Data Sheets) zu orientieren. Exemplarisch sei dies im Bereich der Automobilindustrie und die damit gegebenen Möglichkeiten aufgezeigt. Grundlage dafür bildet zunächst die Norm VDA 260, „Kraftfahrzeuge – Kennzeichnung von Bauteilen aus polymeren Werkstoffen“. Parallel dazu lässt sich das „International Material Data System“ (IMDS) nutzen, ein weltweit standardisiertes Austausch- und Verwaltungssystem für Materialdaten, an dem sich aktuell 35 Automobilhersteller und 120'000 Lieferanten/Zulieferer beteiligen.

1.1.3 Werkstoffdatenbanken

Werkstoffauswahl (teils in Kombination mit Konstruktion) gehören gewissermaßen zur Kernkompetenz dieser nützlichen Einrichtungen. Gerade im Kunststoffbereich erweisen sie sich seit Jahrzehnten als unverzichtbare Begleiter bei der täglichen Arbeit. Dieser zentralen Bedeutung entsprechend findet sich im Abschnitt *Hinweise zur Benutzung des Buches* eine Auflistung wichtiger Anbieter sowohl auf nationaler als auch internationaler Ebene.

1.2 Bedeutung der Kunststoffe

Wenn im Jahr 2021 rund 391 Mio. t Kunststoffe weltweit produziert wurden (davon entfallen etwa 57 Mio. t auf Europa), so spricht diese Zahl für sich selbst. Was sind die Ursachen für das gigantische Wachstum dieser Werkstoffklasse über die letzten Jahrzehnte?

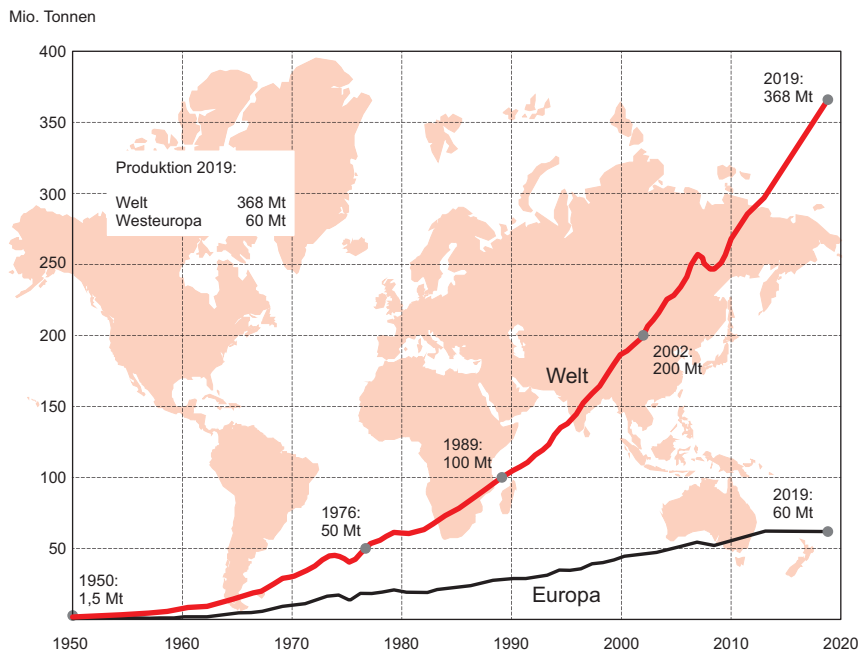


Bild 1.4: Weltweite und europäische Produktionsmengen von Kunststoffen 1950 bis 2019. Die Energie- und Finanzkrise hinterlassen eine spürbare Delle (Mengenangaben Thermoplaste, Polyurethane und Duroplaste inkl. Klebstoffe, Beschichtungen, Dichtungsmaterial und PP-Fasern).

Quelle: **PlasticsEurope, Business Data and Charts 2019**

1.2.1 Wachstumsursachen

Eine erste und zugleich triviale Erklärung, die gerne übersehen wird ist die Koinzidenz mit der Wachstumskurve der Menschheit im selben Zeitabschnitt, vgl. Bild 1.5.

Der Bedarf nach mehr Materialien in dieser Zeitperiode, verursacht vor allem durch das *weltweite Wachstum* der Bevölkerung (Stand 2022: 8 Mia.) und den *zunehmenden Wohlstand* in vielen Ländern, bot dem Werkstoff Kunststoff die einmalige Gelegenheit sich für viele Bereiche als das ideale Material für eine Massenproduktion zu profilieren, vgl. 1.2.1.4. Eine vertiefte Analyse weist zudem auf die Tatsache hin, dass die Generation der über 60-jährigen auf der ganzen Welt – insbesondere in den Entwicklungsländern – weiterhin stark anwachsen wird.

zunehmender Wohlstand

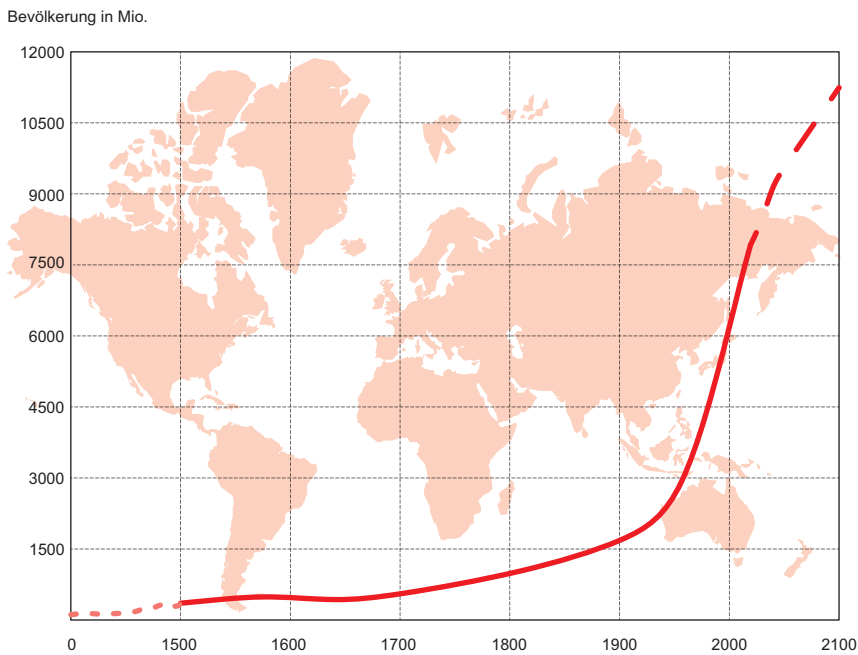


Bild 1.5: Wachstum der Weltbevölkerung zwischen **1950** und **2019** von **2,53 Milliarden** auf **7,71 Milliarden** Menschen

Davon losgelöst und das Augenmerk nur auf den Werkstoff Kunststoff gelenkt, geraten für dieses Wachstum zusätzliche Blickwinkel in den Vordergrund, die nachfolgend beschrieben werden.

1.2.1.1 Die Petrochemie als Rohstofflieferant

Obwohl langfristig aus Sicht der Chemie neben Erdgas und Erdöl durchaus auch realistische Alternativen zur großtechnischen Erzeugung von Kunststoffen vorhanden sind, bleibt bis auf Weiteres die Petrochemie aus Kostengründen der wichtigste Rohstofflieferant. Für einen „Kunststöffler“ schmerzt indes der weltweite Jahresverbrauch an Erdöl, der sich im Jahr 2018 auf *4,6 Milliarden Tonnen* belief, wovon nur etwa 5% für die Erzeugung von Kunststoffen Verwendung fanden. Demgegenüber beansprucht die Erzeugung von Energie und/oder Wärme (Verkehr, Heizung etc.) jährlich rund 90% des Erdöls, verwandelt sich dabei förmlich in „Luft“, hinterlässt keine verwertbaren Recyclingprodukte und verschwendet damit in riesigen Mengen unwiederbringlich – zumindest bis in naher Zukunft – einen kostbaren Rohstoff. Auch

Erzeugung von Energie
jährlich rund
90% des Erdöls

schwarzes Gold

als schwarzes Gold bezeichnet wäre die Menschheit besser beraten mit dem Erdöl sparsamer umzugehen. Künftigen Generationen bliebe so die Möglichkeit erhalten es sinnvoller zu nutzen, z. B. für die chemische Industrie (Arzneimittel, Kunststoffe etc.).

1.2.1.2 Leichtgewicht Kunststoff

Gewichts-
vergleich

Die häufigsten am Aufbau der Kunststoffe beteiligten chemischen Elemente sind Kohlenstoff (C) und Wasserstoff (H). Dabei kommt dem Wasserstoff das Privileg zu, dass seine Atome die absolut geringste Massenzahl besitzen. Werden beispielsweise die Wasserstoffatome im Polyethylen (PE) vollständig durch Fluoratome ersetzt, so entsteht in der Folge Polytetrafluorethylen (PTFE). Die Dichte erhöht sich dabei von vergleichsweise ca. 0,96 auf 2,20 kg/dm³.

Noch drastischer fällt der Vergleich aus, wenn die angenommene mittlere Dichte der Kunststoffe von 1,2 kg/dm³ der von Eisenwerkstoffen mit 7,8 kg/dm³ gegenübergestellt wird.

Da Bauteile häufig ein gegebenes Volumen berücksichtigen müssen (z. B. Verpackungen), resultiert daraus gegenüber anderen Werkstoffklassen ein kostenreduzierendes geringeres Gewicht für die Kunststoffe. So beträgt beim Transport von Joghurt mit Lastwagen der Verpackungsanteil bei Glas 36 %, beim Einsatz von Kunststoffbechern lediglich 4 % des gesamten Transportgewichts, vgl. Bild 1.6.

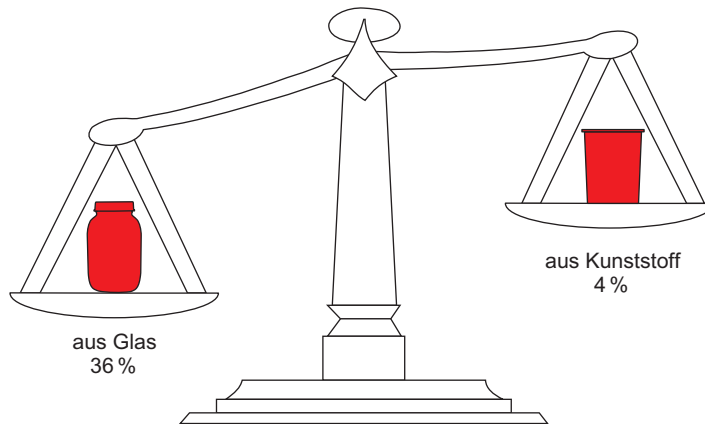


Bild 1.6: Verpackungsanteil bei Joghurtbechern

Quelle: SwissPlastics

1.2.1.3 Energiegünstiges Verhalten

Volumenbezogen bleibt der Maßstab, wenn es darum geht, einen aussagekräftigen Vergleich im Hinblick auf den Energiebedarf für die Herstellung einzelner Werkstoffe zu finden, vgl. Bild 1.7.

Zudem lassen sich verschiedene Kunststoffe aufgrund ihrer chemischen Struktur, z. B. Polyethylen (PE), aus Kohlenstoff- und Wasserstoffatomen aufgebaut, als zusätzliche Energiespeicher definieren, da sie bei der Verbrennung zur Energiegewinnung genutzt werden können, vgl. Abschnitt 17.2.4.3.

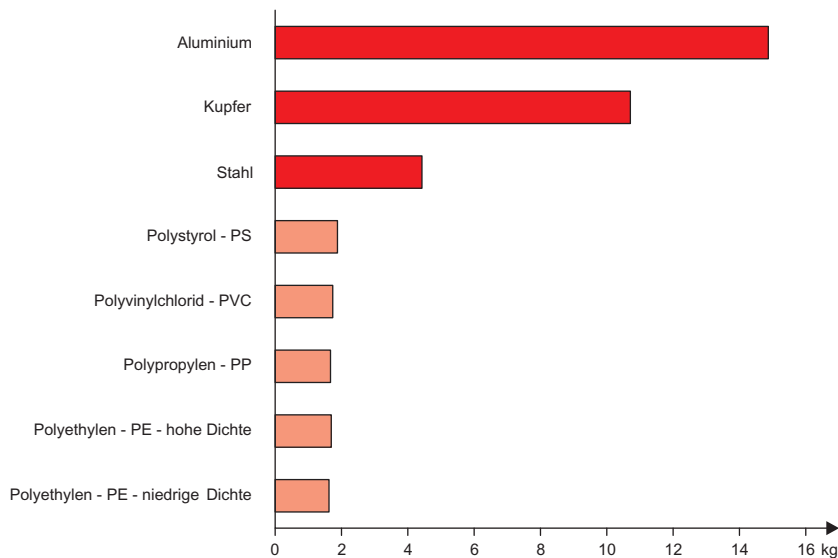


Bild 1.7: Energiebedarf für die Herstellung von Werkstoffen gemessen in kg Erdöläquivalent bezogen auf 1 dm³ (1 Liter) Materialvolumen

Quelle: *Argumentarium GKV*

1.2.1.4 Komplexe Formteilgeometrien und hoher Automatisierungsgrad

Durch die üblicherweise im Schmelzzustand stattfindende Formgebung (Urformen) lassen sich bei gleichzeitig hohem Stand des Werkzeug- und Formenbaus sowie rascher vollautomatischer Fertigungsprozesse Bauteile resp. Halbzeuge mit komplexen Formteilgeometrien in großer Stückzahl herstellen. Daraus resultieren kostengünstige Massenproduktionen, bei denen die relativ niedrigen Verarbeitungstemperaturen (im Mittel ca. 200 bis 300 °C) zusätzlich Kosten sparend in Erscheinung treten. Auch entfällt in der Regel eine kostspielige und zeitraubende Nacharbeit von Oberflächen sowie deren Schutz durch Lackieren. Einfärbungen werden zudem bereits im Schmelzzustand vorgenommen.

niedrige
Verarbeitungs-
temperaturen

1.2.1.5 Nutzung von Synergien

Neben so wichtigen Eigenschaften wie Flexibilität, Transparenz, gutes elektrisches und thermisches Isoliervermögen, hohe chemische Beständigkeit, die von Kunststoffen im Einzelfall erwartet werden, besticht seit längerem auch ihre Eignung als Funktionswerkstoffe. Dies bedeutet, dass das betreffende Kunststoffbauteil zusätzlich zu seiner ursprünglichen Funktion weitere Aufgaben in Eigenregie übernimmt. Beispiele finden sich u. a. bei Kunststoffen für optische Anwendungen, biologisch abbaubaren Polymeren (Medizin, Verpackung) sowie auf dem Gebiet der intrinsisch leitfähigen Kunststoffe, vgl. Kapitel 15.

Funktions-
werkstoffe

1.2.1.6 Hohe Wertschöpfung des Erdöls

bei der
Synthese zu
Kunststoffen

Abschließend sei auf die hohe Wertschöpfung hingewiesen, die das Erdöl bei der Synthese zu Kunststoffen gewinnt. Durch die Ver-/Umwandlung in Werkstoffe (und bei Bedarf allen voran die chemischen Elemente Stickstoff und Sauerstoff u. a. schadlos in das Gerüst der Makromoleküle einbauen zu können) gelang und gelingt es nach wie vor Einsatzgebiete zu erschließen, die bislang als Utopie galten, z. B. in der Luft- und Raumfahrt, Robotik oder im IT-Bereich, vgl. Kapitel 2.

1.2.2 Kunststoffe und die Grundbedürfnisse des Menschen

Maslowschen
Bedürfnis-
pyramide
fünf Grund-
bedürfnisse des
Menschen

Frägt man nach den Grundbedürfnissen eines Menschen, so sind diese in einem erweiterten Modell der Maslowschen Bedürfnispyramide auf den drei unteren Stufen zu finden, vgl. Bild 1.8. Vereinfacht ausgedrückt lassen sie sich in Form einer Prioritätenliste oft an einer Hand abzählen: z. B. *Nahrung, Bekleidung, Wohnung, Gesundheit und Kommunikation*. In all diesen fünf Bereichen leisten Kunststoffe einen bedeutenden Beitrag, ohne den – in unserer westlichen Zivilisation – die hohen Ansprüche des Individuums an diese Bedürfnisse nur schwerlich zu erfüllen wären. Auch gehören viele dieser Kunststoffanwendungen mittlerweile so zum Alltag, dass der Kunststoff als solcher gar nicht mehr wahrgenommen wird.

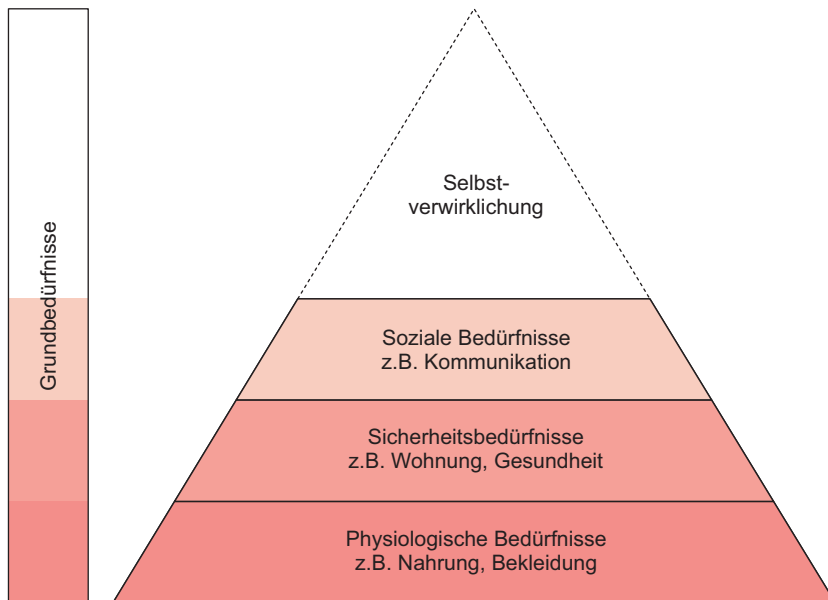


Bild 1.8: Erweitertes Modell der Maslowschen Bedürfnispyramide

1.2.2.1 Nahrung

Da Nahrungsmittel nicht unbeschränkt haltbar sind, benötigen sie einen Schutz vor vorzeitiger Verderbnis. Gerade in industriellen bzw. postindustriellen Gesellschaften ist daher die Versorgung der Bevölkerung mit dem vielfältigen Lebensmittelanangebot

ohne Kunststoffverpackungen impraktikabel (z. B. Tiefkühlkost). Unversehrtheit beim Transport, einschließlich vereinfachtes Handling, Haltbarkeit und Hygiene der Nahrungsmittel könnten durch „Kunststoff-Know-how and Know-why“ in der Verpackungstechnik deutlich verbessert werden. Überdies würde das Materialgewicht, beispielsweise beim Ersatz der Kunststoffe durch Papier, um ein Mehrfaches ansteigen – mit schwerwiegenden ökonomischen und ökologischen Konsequenzen.

Süßwasser ist eine Voraussetzung für das Überleben der Menschheit, sei es als Trinkwasser oder zur Erzeugung von Nahrung. Hier spielen Kunststoffe u. a. als Rohre zur Wasserver- und -entsorgung, als Schäume, Folien, Vliese und dergleichen zur Speicherung von Wasser in den Böden eine herausragende Rolle. Eine Anwendung mit steigender Wichtigkeit sind Kunststoffe als Filtermembranen für die Trinkwasseraufbereitung.

Wasser: Quell
des Lebens

1.2.2.2 Bekleidung

Ohne dieses Thema in langatmigen Details zu erschöpfen, sei der moderne Mensch mit all seinen Aktivitäten in Beruf, Freizeit und Sport als Wachstumsfaktor für den Bedarf von „Chemiefasern“ in Erinnerung gebracht. Modische Kleiderstoffe und Accessoires, Ski- und Jogginganzüge, daneben schusssichere Westen aus Aramid für die Polizei, Schutanzüge für die Feuerwehr, mögen beispielhaft die Millionen Tonnen von Kunststoffen zur Erzeugung von Synthefasern illustrieren. Nicht zu vergessen der Einsatz von Kunststoffen als bevorzugte Werkstoffe z. B. als Kopf- und Augenschutz (Helme und Brillen) oder im Schuhbereich (von der Sandale bis zum Stiefel).

Schutz und
Sicherheit

Aus aktuellem Anlass einer Pandemie: Schutzkleidung „von Kopf bis Fuß“ aus Kunststoffen (meist als Folien) bei der Behandlung und Prävention.

1.2.2.3 Wohnung

Ausgehend von so fundamentalen Anforderungen an das Wohnen wie Wärme-/Kälteisolation oder Nutzung der Elektrizität (Beleuchtung, Heizung, Kommunikation, Motoren usw.) sind Kunststoffe im modernen Wohnungsbau unersetzliche Werkstoffe.

Bei einer Aufwertung des Begriffs Wohnung in Wohnbereich kommen zusätzliche Anwendungen mit ins Spiel, wie z. B. Lacke und Farben auf der Basis von Kunststoffen, Möbel, Teppiche, Vorhänge und dergleichen. Nicht zuletzt sei an dieser Stelle der wertvolle Beitrag der Kunststoffe bei Altbausanierungen (z. B. Bautenschutzfolien, Nasszellen, Fensterprofile) als umweltschonende Materialien in Erinnerung gebracht. Der altgediente Slogan „Kunststoffe – Werkstoffe der Zukunft“ hat daher nach wie vor seine volle Berechtigung.

Kunststoffe als
Isolations-
materialien

1.2.2.4 Gesundheit

Wer ist sich schon bewusst, welche „Dienstleistungen“ von den Kunststoffen zur Erhaltung der Gesundheit erbracht werden? Ohne in langatmigen Aufzählungen zu verweilen, sei der Kunststoff als Mittel zum Zweck im Sportbereich ausgewählt: zu Lande (Skifahren, Surfen, Tennis, Jogging, Ballspiele, Turngeräte, Matten etc.), zu Wasser (Schnorcheln, Tauchen etc.) und in der Luft (Gleitschirm-, Segel- und Motor-Fliegen etc.).

Kunststoff als
Mittel zum
Zweck

Und ohne Kunststoffe keine moderne Medizintechnik, vgl. Abschnitt 15.4. Angefangen von den wiederverschließbaren Infusionsbeuteln, Kanülen etc. zur sicheren Versorgung der Patienten mit Medikamenten. Aus aktuellem Anlass: knickfreie Beat-

ohne
Kunststoffe
keine moderne
Medizintechnik

mungsschläuche, die lebensrettenden Sauerstoff in die Lunge von Erkrankten leiten oder körperverträgliche Sonden aller Art. Selbst ambulante Eingriffe sind ohne «Kunststoffhelfer» undenkbar.

Außerdem lassen sich mit biologisch abbaubarem Nahtmaterial und Knochennägeln auf der Basis von Polymilchsäure – Polylactid – die Risiken und Kosten einer Nachoperation vermeiden. Dabei ist der strukturelle Aufbau der Polylactide so gewählt, dass die Resorption nicht schlagartig sondern innerhalb eines wählbaren Zeitraums stattfindet. Auf diese Weise kann z. B. ein Abbau beim Nahtmaterial in Relation zur fortschreitenden Wundheilung erfolgen, d. h. Fadenreißkraft und Wundheilung stehen bei dieser Technik umgekehrt proportional zueinander. Ebenfalls Stand der Technik sind die Arzneimittel-Abgabe-Systeme (Drug-Delivery-Systems), bei denen der Wirkstoff über einen definierten Zeitraum hinweg – an einen festgelegten Ort im Körper – in einer im voraus bestimmten Rate abgegeben wird. Bei dieser eleganten Form der Arzneimittelabgabe, die zur Langzeitbehandlung von Patienten dient, übernehmen Polymere die Aufgabe, als Verzögerungssystem zu wirken, z. B. in Form einer Matrix als Hemmsubstanz mit dispergiertem Wirkstoff.

- Implantate Weitere Beispiele sind Implantate im Hüft- und Kniebereich aus Polyetheretherketon (PEEK) bzw. ultrahochmolekularem Polyethylen (UHMWPE). Außerdem ergeben sich Anwendungen für Kunststoffe im Bereich der Orthesen, Prothesen oder bei Inlays, z. B. für Hörgeräte, wo auch Materialien wie Polyurethane (PUR), Silicone u. a. zum Einsatz kommen. Großes Wachstumspotenzial besitzen nach wie vor Verfahren wie die Additive Fertigung bzw. der 3D-Druck, mit denen sich bereits heute Ersatzteile für den Bedarf eines einzelnen Patienten herstellen lassen, vgl. Abschnitt 3.5.11.
- Hörgeräte
- Operationsnachsorge Ein breites Einsatzgebiet findet sich zudem bei der Operationsnachsorge und Pflege. So leisten beispielsweise sauerstoff- und dampfdurchlässige Folienverbände aus PUR unverzichtbare Dienste im Bereich der Wundversorgung. Stellvertretend für ganze Bauteile aus Kunststoff sei abschließend eine künstliche Niere erwähnt, die dank ihrer semipermeablen Membran aus ultradünnen Kunststoffhohlfasern eine Blutwäsche ermöglicht und von deren Einsatz allein in Deutschland das Überleben von rund 100'000 Menschen abhängt (Stand 2020).
- künstliche Niere

Aus aktuellem Anlass einer Pandemie: Bruch sichere Schutzwände aus transparenten Kunststoffen zwischen Personal und Kundschaft.

1.2.2.5 Soziale Bedürfnisse

- schnelle Kommunikation und Information Was auch immer unter diesem Oberbegriff zu nennen ist, ohne Kommunikation geht (fast) nichts. Insbesondere schnelle Kommunikation und Information über Wort und Schrift sind zu unerlässlichen Voraussetzungen geworden, um die Lebensqualität des Einzelnen zu gewährleisten. Die heute fast beliebige Verfügbarkeit Informationen zu speichern ist zugleich das Ergebnis einer stürmischen Kunststoffentwicklung, die mit der Vinylplatte aus PVC begann, abgelöst durch das Ton-/ Videoband beschichtetes Polyesterband), gefolgt von CD/DVD (vor allem aus Polycarbonat, PC) bis hin zum Prozessor, dem Herzstück des Computers, auch als CPU (Central Processing Unit) bezeichnet, vgl. Abschnitt 15.2.4. Parallel dazu bewiesen Kunststoffe ihre Überlegenheit als isolierende und Kosten sparende Gehäusewerkstoffe für Kommunikationsmittel aller Art (u. a. Telefon, Smartphone, Computer). Und was den vorläufig noch wichtigsten Informationsträger anbelangt: ohne Kunststoffe vielfach keine glatten und damit bedruckbaren Papieroberflächen in riesigen Mengen und zugleich preisgünstiger Form.
- Telefon, Smartphone, Computer

1.3 Geschichte der Kunststoffe

Zu den Vorläufern unserer heutigen Kunststoffe zählen Naturstoffe wie Bernstein, Kopalharz, Schildplatt oder Horn, die seit Menschengedenken den Status von Werkstoffen einnehmen. Ihr kunststoff-ähnliches Verhalten resultiert aus ihrer Struktur, die sie als natürliche Polymere ausweist, vgl. dazu Abschnitt 2.1 und 3.1. Überdies lassen sich selbst für abgewandelte Naturstoffe bereits Belege für ihre Verwendung als „Kunststoff“ finden. An Hand von archäologischen Funden lässt sich belegen, dass bereits vor mehr als 200'000 Jahren ein von Menschenhand erzeugtes *Birkenpech* als *Klebstoff* diente. Als Rohstoff diente Birkenrinde, für deren Umwandlung in ein Pech bereits die Neandertaler (vermutlich!) verschiedene Varianten kannten. Nebenbei bemerkt bestand die im Mittelalter übliche Methode in einem Verschmelzungsprozess, chemisch bekannt als trockene Destillation bei Temperaturen zwischen 360 und 400 °C. Anwendung als Klebstoff fand es beispielsweise bei den Neandertalern zur Befestigung ihrer aus Stein (u. a. Feuerstein) und Holz gefertigten Werkzeuge und Waffen (Messer, Speere etc.). Klebeverbindungen samt Herstellung der dazu benötigten Klebstoffe gehören damit zu den ältesten handwerklichen Techniken in der Geschichte der Menschheit.

Birkenpech
als Klebstoff

trockene
Destillation

Supplementär: Animationen zu Birkenpech.

Einen geradezu rituellen Status erlangten einige Harze und ihre Abkömmlinge im alten Ägypten. Bei der Mumifizierung ihrer Toten verwendeten sie zur mehrfachen Umhüllung der Leichname zunächst in Streifen geschnittenes Material, z. B. ausgediente Textilien. Die so entstanden Bandagen wurden mit Harz zusammengeklebt. Zum Einsatz kamen dabei auch kostbare Harze wie etwa das „styrolhaltige“ Storaxharz; vgl. Kapitel 6. Bei einer genaueren Betrachtungsweise der damaligen Wickeltechnik ergeben sich frappante Ähnlichkeiten zu den noch heute gepflegten handwerklichen Laminierverfahren.

Laminier-
verfahren

Verfolgt man die Geschichte der Kunststoffe und ihrer Herstellung bis auf urkundlich belegte Quellen zurück, so reduziert sich der Zeitraum, den die Forschung auf diesem Gebiet vorläufig erfasst, drastisch. Es tritt eine Zeitspanne zutage, die rund ein halbes Jahrtausend zurückreicht, jedoch immer noch viel größer ist als gemeinhin angenommen wird. Bereits um 1530 wurde im Augsburger Hause der Fugger das erste überlieferte Rezept zur Herstellung eines Kunststoffs niedergeschrieben. Besitzer dieses Rezeptes war Bartholomäus Schobinger, Bürger von St. Gallen (Schweiz), von dem es der bayerische Benediktinerpater Wolfgang Seidel (1492–1562) persönlich übernahm und in seinen Tagebüchern festhielt, vgl. Bild 1.9.



Bild 1.9: Bartholomäus Schobinger (1500–1585)

Besitzer des ersten überlieferten Rezeptes zu Herstellung eines Kunststoffs
Münze, Historisches Museum St. Gallen

Als Rohstoff diente Ziegenkäse, der zu diesem Zweck eine längere Kochprozedur erfährt, um schließlich als durchsichtig formbares Harz vorzuliegen. In die heutige Sprache übertragen, lautet das Rezept wie folgt:

„Nimm einen Ziegen- oder sonst einen mageren Käse, zerschneide ihn dann in Stücke, gebe diese in einen Kessel, tue Wasser dazu und lasse ihn einen Tag lang schön sieden, dass er zersiede, tue ihn hernach vom Feuer, lasse ihn abkühlen, bis sich die dicke Materie setzt, dann gieße das Weiße, das wie eine Milch ist, das auch oben schwimmt, darvon. Das aber am Boden bleibt, das lasse liegen, gieße wieder heißes Wasser dazu, lasse es ein wenig aufsieden, rühre es dabei wohl um, damit sich das Weiße davon scheidet. Tue dies so oft, bis nichts Weißes mehr abgeht, so bleibt unten am Boden eine Materie, zäh wie ein Horn, ist wie ein „Rangulum“ oder Tropfen. Nachdemselbigen (Anm.: Gemeint ist nach diesen Arbeiten.) nimm eine warme Lauge, die gut warm sein muss. Dahinein wirfst du die gereinigte Materie und drückst sie warm aus der Lauge in eine Form. Sobald dies geschehen ist, wirfst du die Form mitsamt der Materie in kaltes Wasser, so wird sie hart wie Bein und fein durchsichtig.

Doch musst du wissen, wenn du diese Materie formen willst und nach deinem Gefallen machen, so musst du dieses tun, solange sie warm ist, so lässt sie sich drücken und biegen wie ein Leim, auch dann, wenn sie schon vorgeformt ist..., sobald die aber kalt ist, so muss man es lassen wie es ist, es lässt sich nicht biegen oder falten, es bricht wie ein Glas...“

Quelle: Georg Schnitzlein – Deutsches Museum, München

Auch in den nachfolgenden Jahrhunderten finden sich immer wieder Ansätze, vorhandene Naturstoffe in Kunststoffe zu verwandeln. Ein großer Durchbruch wurde Mitte des vorletzten Jahrhunderts (um 1850) erzielt, als es erstmals gelang, Kautschuk und Cellulose chemisch so zu verändern, dass sich die entstandenen Umwandlungsprodukte durch völlig neue Eigenschaften auszeichneten (Gummi, Vulkanfiber, Celluloid). Die Chemie der abgewandelten Naturstoffe erlebte in den darauf folgenden sechs bis sieben Jahrzehnten einen gewaltigen Aufschwung (bis ca. 1930) und feierte mit Produkten wie Kunsthorn aus Kasein (auf der Basis von Milcheiweiß), dem Zellglas und den Cellulosederivaten (Celluloseacetat, -butyrat usw.) großartige Triumphe. Parallel einher ging dazu die Entwicklung geeigneter Verarbeitungstechnologien und Verarbeitungsmaschinen für diese neuartigen Materialien. Rückblickend ist diese Epoche als die technologische Wurzel der heutigen Kunststofftechnik zu bezeichnen.

Ebenfalls zur gleichen Zeit begann mit der berühmten Harnstoffsynthese von Friedrich Wöhler (1828) der Siegeszug der organischen Chemie, die als neuer Zweig der chemischen Forschung eine Fülle neuartiger Stoffe und Verbindungen auf der Basis von Kohlenstoff hervorbrachte. Darunter befanden sich auch zähflüssige bis feste Verbindungen, die durch Einwirken von Licht und/oder Wärme aus einfachen gasförmigen oder flüssigen Substanzen entstanden. Ihre wissenschaftliche Erforschung erfolgte allerdings erst Anfang des letzten Jahrhunderts. Doch bereits den ersten Vertretern dieser Synthese-Werkstoffe, die es bis zur technischen Reife brachten, war ein großer Erfolg beschieden und sie gelangten als Materialien in Industriezweigen wie Elektro- und Flugzeugindustrie zu großem Ansehen. Als die vier Asse aus dieser Zeit sind hier namentlich zu erwähnen: Phenolharz (PF), Acrylglas (PMMA), Polyvinylchlorid (PVC) und Polystyrol (PS). Der wissenschaftliche Durchbruch bleibt dabei mit dem Namen des deutschen Chemikers Hermann

Staudinger (Nobelpreis 1953) verbunden, der in seinen bahnbrechenden Arbeiten um 1920 (ETH Zürich) zeigte, dass viele Naturstoffe und alle Kunststoffe aus Makromolekülen bestehen.

Zitat:

„Da es sich bei diesen Hochpolymeren um typisch organische Verbindungen handelt, so müssen diese homöopolar gebauten Stoffe Moleküle bilden; nur sind diese im Vergleich mit den einfachen Verbindungen sehr groß, so daß für sie der Name Makromoleküle vorgeschlagen wurde.

Die Welt der organischen Verbindungen liegt gewissermaßen zwischen den einfachen Kohlenstoffverbindungen, dem Methan, den Kohlenoxyden, dem Cyan und den allergrößten Molekülen, dem hochpolymeren Kohlenstoff.

Trotz der großen Zahl von organischen Körpern, die wir heute schon kennen, stehen wir so erst am Anfang der Chemie der eigentlichen organischen Verbindungen und haben nicht etwa einen Abschluß erreicht.“

Hermann Staudinger, Ber. Dtsch. Chem. Ges. 59.301 (1926)

Beflügelt durch die Visionen Staudingers verstärkten viele Hochschul- und Industrielaboratorien ihre Forschungsanstrengungen auf dem Gebiet der Kunststoffchemie. In der Folge gelang es, die chemischen Reaktionen, die zum Aufbau von Kunststoffen führen, immer besser zu verstehen und vor allem neue Synthesen zu finden.

Das Ergebnis waren Kunststoffe verschiedenster Art, die je nach eingesetztem Ausgangsmaterial, Zusatzstoffen und entsprechender Prozessführung Produkte mit ganz bestimmten Eigenschaften ergaben, die gleichzeitig für unterschiedlichste Zwecke brauchbar waren. Für die Jahre zwischen 1930 und 1950 sind als herausragende Entwicklungen viele so genannte technische Kunststoffe zu nennen, wie die Polyamide, die Polyester, das Polyethylen oder die fluorhaltigen Polymere, die Polyurethane und die Epoxidharze. Gleichzeitig wurde in der chemischen Industrie die verfahrenstechnische Basis gelegt, um großtechnisch Kunststoffe als Werkstoffe herstellen zu können.

Ein weiterer wissenschaftlicher Groß Erfolg gelang den beiden Forschern Giulio Natta und Karl Ziegler im Jahre 1952 durch die Verwendung neuartiger Katalysatoren bei der Herstellung von Polyolefinen. Der bis dahin nur bei hohem Druck und hohen Temperaturen mögliche Polymerisationsprozess konnte auf diese Weise auch bei normalem Druck und niedrigen Temperaturen durchgeführt werden. Gleichzeitig gelang es auf diese Art, Makromoleküle mit einem hohen räumlichen Ordnungsgrad zu synthetisieren. Diese Erkenntnis, mit Hilfe so genannter stereospezifischer Katalysatoren das Gefüge (Morphologie) eines Kunststoffs und damit seine Eigenschaften zu beeinflussen, hat bis in die jüngste Zeit zu neuen großartigen Produktentwicklungen geführt. Als Stichwort sei hier die neue Klasse von Katalysatoren erwähnt, die so genannten Metallocene.

Der Streifzug durch die Geschichte der Kunststoffe wäre unvollständig, ohne gleichzeitig an die herausragenden Leistungen zu erinnern, die neben der Chemie – speziell im Maschinenbau und im Bereich der Physik/Materialwissenschaften – weltweit erbracht wurden. Jede zukünftige Entwicklung wird daher immer nur insofern erfolgreich sein können als es gelingt, diese Wechselbeziehung im Sinne einer interdisziplinären Zusammenarbeit zu pflegen und zu respektieren, vgl. Bild 1.10.

Giulio Natta
Karl Ziegler
Nobelpreis
1963

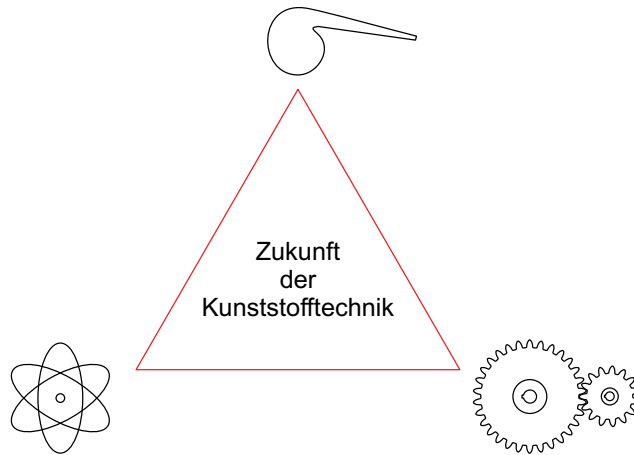


Bild 1.10: Die Zukunft der Kunststofftechnik im Spannungsfeld der Wechselbeziehungen zwischen Chemie, Physik und Ingenieurwissenschaften

1.3.1 Kurzer Abriss der Entwicklung der Polymerwissenschaften (ohne Copolymere und Blends)

Quelle: P. Smith und Natalie Stutzmann, ETH Zürich

Kunststoff aus Kasein 1530

Bartholomäus Schobinger (1500–1585)

Der St. Galler Bartholomäus Schobinger verrät Wolfgang Seidel, Mönch in Tegernsee und Andechs, eine geheime Rezeptur:

„Wenn man den Anweisungen folge leiste, kann man daraus Tischplatten, Trinkgeschirr und Medaillons gießen – also alles, was man will.“

Erste überlieferte Rezeptur für einen Kunststoff

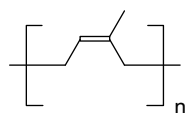
Vulkanisation von Kautschuk 1839

Charles Goodyear (1800–1860)

Die Verwendung von Naturkautschuk, der aus dem Milchsaft bestimmter Pflanzenarten gewonnen werden kann, ist bereits in Abbildungen mexikanischer Indianer aus dem 10. Jahrhundert dargestellt.

Charles Goodyears Vulkanisation (= weitmaschige Vernetzung der Polymerketten) mit Schwefel macht den Kautschuk elastisch und haltbar, und dadurch erst technisch einsetzbar.

U.S. Patent 3633



(1.1)

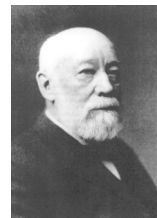
Kautschuk: caa ocho (indianisch): tränender Baum

Celluloid 1870**John W. Hyatt (1837–1920)**

J. W. Hyatt entwickelt den ersten kommerziell erfolgreichen Kunststoff auf Grund Parkes' leicht entflammbarer Nitrocellulose-Campher-Mischung (Celluloid).

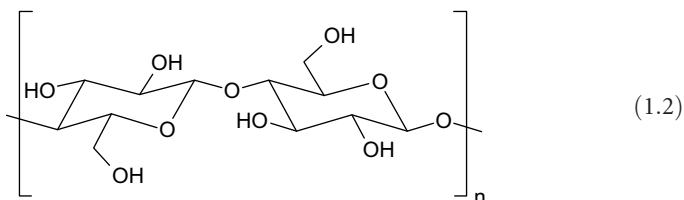
U.S. Patent 105338

Anwendungen: Photographische Filme (eingeführt von George Eastman 1884), Tischtennisbälle, Käämme

**Viskose 1892****Charles Cross (1855–1935)****Edward Bevan (1856–1921)****Clayton Beadle (1868–1917)****Hilaire Bernigaud, Comte de Chardonnet (1839–1924)**

C. Cross, E. Bevan und C. Beadle entwickeln, basierend auf Chardonnet's Methode zur Regenerierung von Cellulose (1884), einen Prozess zur Herstellung von Viskose. Durch eine chemische Reaktion werden die Polymermoleküle vorübergehend modifiziert, damit die Cellulose verarbeitbar wird.

U.S. Patent 520770



Anwendungen: Cellophan[®]-Filme, Rayon[®]-Fasern (rayonner (franz.): glänzen)

**Protein-Struktur 1906****Emil H. Fischer (1852–1919)**

Um 1900 sind 16 von den 20 Aminosäuren, welche als Grundbausteine der Proteine gelten, bekannt.

E. H. Fischer beschreibt das Formen von chemischen Verbindungen in Proteinen mit einem korrekten Mechanismus (Peptid-Verbindungen zwischen benachbarten Aminosäuren).

1906 prägt E. H. Fischer den Ausdruck „Polypeptid“.

Ber. Chem. Ges. 39, 530 (1906)

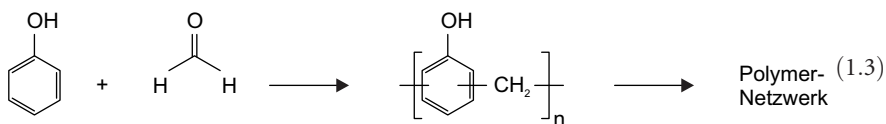
**Bakelit (Phenol-Formaldehyd-Harz) 1907****Leo H. Baekeland (1863–1944)**

L. H. Baekeland meldet 1907 grundlegende Patente zur Herstellung von Phenol-Formaldehyd-Harzen (PF) an.

Die von ihm gegründete Bakelitgesellschaft startet erste technische Produktion von PF-Harzen, den ältesten vollsynthetischen Kunststoffen, 1910.

U.S. Patent 942699





Anwendung: Isolatoren, Stecker, Schalter, Billardkugeln, Radiogeräte

Struktur von Gummi 1910

Samuel S. Pickles (1878–1962)

S. S. Pickles schlägt für Gummi eine (zyklische) Kettenstruktur vor.

J. Chem. Soc. 97, 1085 (1910)

Er erhält 1939 die Colwyn-Goldmedaille für seine wertvollen Beiträge für die Gummi-Industrie.

Polyvinylchlorid (PVC) 1912

Friedrich Klatta (1880–1934)

F. Klatta, Griesheim-Elektron, lässt die Polymerisation und industrielle Produktion von Polyvinylchlorid (PVC) patentieren.

Heute stellen PVC und die anderen chlorierten Polymere die zweitgrößte Kunststoffgruppe dar.



Dt. Patent 28877

Anwendungen: Grammophonplatten, Flaschen, Regenmäntel, Spielzeuge, Schläuche, ...

Makromoleküle 1920

Hermann Staudinger (1881–1965)

Vor der Schweizerischen Chemischen Gesellschaft stellt H. Staudinger, ETH-Zürich, 1917 zum ersten Mal seine Spekulation vor, dass „hochmolekulare Verbindungen“ aus kovalent-gebundenen, langkettigen Molekülen bestehen.

1920 begründet H. Staudinger mit seinem Artikel „Über Polymerisation“ die modernen Polymerwissenschaften.

Ber. Chem. Ges. 53, 1073 (1920)

Der Term „Makromolekül“ wird 1922 von ihm eingeführt.

H. Staudinger erhält 1953 den Nobelpreis für Chemie.

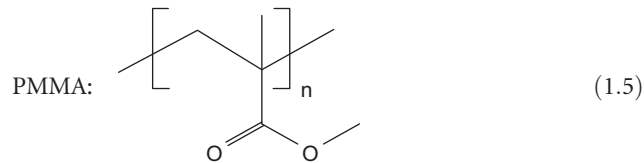
Acrylkunststoff 1927

Otto Röhm (1876–1939)

Durch die Polymerisation von Methylmethacrylat stellt O. Röhm das erste Stück „organisches Glas“ her.



Die industrielle Produktion von Polymethylmethacrylat (PMMA) beginnt 1935 bei Röhm & Haas unter dem Markennamen Plexiglas[®], bekannt heutzutage auch als Perspex[®], Diakon[®], Lucit[®] und O-roglass[®], ...



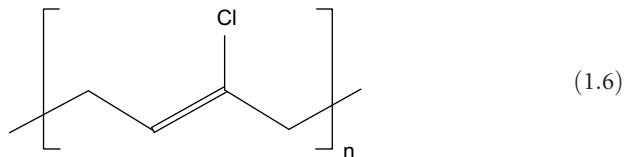
Anwendungen: Flugzeugverglasungen, Rückstrahler, Verkehrsschilder, Duschkabinen, ...

Synthetischer Gummi 1931

Julius Nieuwland (1878–1936)

J. Nieuwland behandelt Divinylacetylen mit Chlorschwefel, wobei „eine elastische Substanz, die stark Naturkautschuk gleicht“, entsteht. Eine Kollaboration mit DuPont führt 1931 schlussendlich zum ersten kommerziell erfolgreichen, vollständig neuen, synthetischen Gummi.

DuPont startet industrielle Produktion von Neopren[®] 1933.



U.S. Patent 1811959

N.B.: Schon 1930 erhalten die I.G. Farben ein Patent für die Emulsions-Polymerisation von Dienen mit Natrium, Buna-Gummi, der jedoch nie auf industrieller Basis produziert wird.

Dt. Patent 511145

Anwendungen: Isolationen für z. B. elektrische Kabel, Surfer- und Taucheranzüge.

Polyethylen 1933

Eric W. Fawcett

Reginald O. Gibson

E. W. Fawcett und R. O. Gibson, Imperial Chemical Industries (ICI), erhalten beim Versuch, Ethylen und Benzaldehyd unter hohem Druck reagieren zu lassen, durch Zufall verzweigtes Polyethylen.

Erste industrielle Kleinserienproduktion startet 1939.



Brit. Patent 471590

Anwendungen: Isolationen für Radarsets, elektrische Isolationen, Verpackungsmaterial, ...





Polymer-Theorie 1934

Werner Kuhn (1899–1963)

W. Kuhn entwickelt das erste statistisch-mechanische Modell für die Viskosität von Polymerlösungen, sowie das Konzept des „ausgeschlossenen Volumens“.

Kolloid Z. 68, 2 (1934)

Im Jahre 1936 führt er ein Modell für die Gummi-Elastizität ein.

Kolloid Z. 76, 258 (1936)



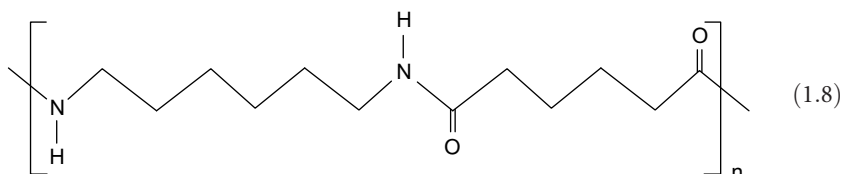
Nylon 1935

Wallace H. Carothers (1896–1937)

Die Pionierarbeit über die Synthese von Polyamiden von W. H. Carothers, DuPont, führt zur Herstellung der ersten vollsynthetischen Polymerfasern.

DuPont startet 1939 kommerzielle Produktion unter dem Markennamen Nylon 6.6.

Weitere Polyamide mit unterschiedlichem chemischen Aufbau sind bekannt als Perlon[®], Rilsan[®], Grilamid[®], Vestamid[®], Stanyl[®].



U.S. Patente 2130947; 2130948

Anwendungen: Fasern, Zahnräder, Heizöltanks, Sportartikel wie Skischuhe, Roller-skates, ...

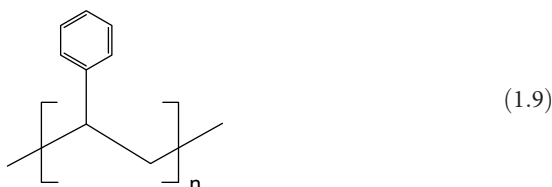


Polystyrol 1936

Hermann F. Mark (1895–1994)

H. F. Mark entwickelt zusammen mit C. Wulff, I.G. Farben, einen kommerziell erfolgreichen Prozess für die katalytische Produktion von Polystyrol (Styron[®], Hostyren[®]).

Polystyrolschaumstoffe (Styropor[®]) werden zum ersten Mal 1951 technisch hergestellt.

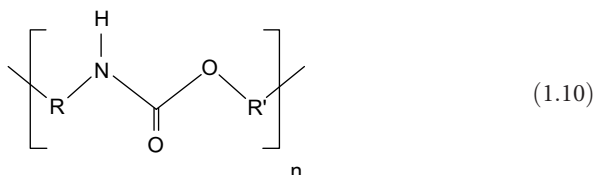


Anwendungen: Transparente Dosen, CD-Hüllen, Einwegbestecke, Verpackungsmaterial, ...

N.B.: Styrol wurde vorher schon mehrere Male, z. B. von E. Simon 1839 sowie von A. W. Hofmann und J. Blyth 1845, polymerisiert, aber ohne den Nutzen des erhaltenen Produkts zu erkennen.

Polyurethane 1937**Otto Bayer**

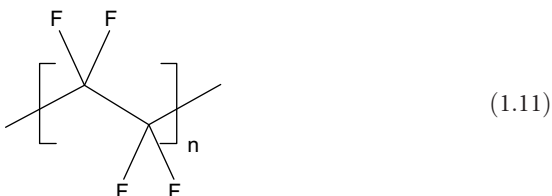
O. Bayer formuliert das Grundpatent für die Herstellung der vielseitigen Polyurethane. Polyurethane werden 1940 von der Bayer AG im technischen Maßstab hergestellt.



Anwendungen: Schuhsohlen, Isolationen für z. B. Gebäude und Kühlschränke, Matratzen, Stoßfänger und Spoiler für Automobilbau, Kleber, ...

**Teflon 1938****Roy J. Plunkett (1910–1994)**

R. J. Plunkett und J. Rebock, DuPont, finden bei der Untersuchung von Kühlmitteln ungewollterweise Poly(tetrafluorethylen) (PTFE), den „schlüpfrigsten“ und chemisch am meisten inerten Feststoff der Welt.



U.S. Patent 2230654

Anwendungen: Dichtungen, Anti-Korrosions-Schutzschichten, künstliche Blutgefäße, „atmende“ Textilien (Gore-Tex[®]), Pfannen, ...

**Silicone 1940****Eugene G. Rochow (1909)**

E. G. Rochow und Mitarbeiter, General Electric, entdecken ein industrielles Syntheseverfahren für Polysiloxane (Silicone). 1942, Müller-Rochow-Synthese auf der Basis von hochreinem Silicium.

Industrielle Großanfertigung beginnt 1947.

Spuren auf dem Mond:

Die Sohlen der „Moonboots“ bestanden aus Silicon.



U.S. Patent 1158218

Anwendungen: Isolationsmaterial, hochtemperaturbeständige Öle, Dichtungen, ...





Polyester 1941

J. R. (Rex) Whinfield

James T. Dickson

J. R. Whinfield und J. T. Dickson, Calico Printers Association, entwickeln Textilfasern aus Polyethylenterephthalat (PET).

Kommerzielle Produktion durch ICI beginnt 1953.



Einführung der ersten PET-Flaschen durch Pepsi-Cola[®] 1975.

Anwendungen: Textilfasern, Filme, Magnetbänder, Flaschen, ...

Bekannte Handelsnamen für PET-Fasern und -Filme sind: Terylen[®], Dacron[®], Trevira[®], Melinex[®], Mylar[®].

Acrylfasern (PAN) 1941

Herbert Rein

H. Rein, I.G. Farben, produziert aus Polyacrylnitril (PAN) unter Verwendung des dazumal neuen Lösemittels Dimethylformamid (DMF) Fasern (Dralon[®], Orlon[®], Dolan[®]).

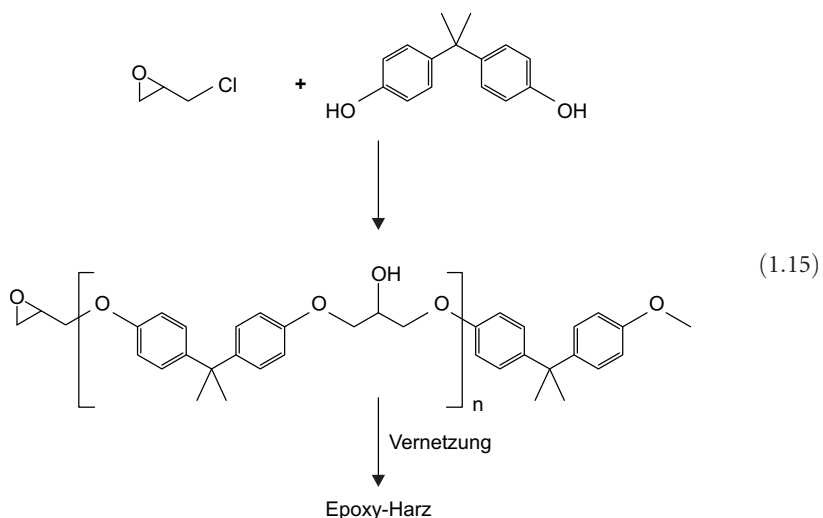


Anwendungen: Hauptsächlich Textilfasern.

Epoxy 1943

P. Castan

Paul Schlack beschreibt 1934 Herstellung und Aufbau von aromatischen Epoxidharzen.



P. Castan, Gebr. De Frey, findet 1943 die für die technische Verwendung entscheidende Härtingsreaktion dieser Harze.

Im Jahr 1946 stellt CIBA die ersten Epoxid-Gieß- und -Lackharze sowie Klebstoffe auf Basis des aromatischen Bisphenol-A-Epoxidharzes her.

Anwendungen: Klebstoffe (Araldit[®]), Verbundwerkstoffe für Sportartikel, Flugzeuge und Raumfahrt.

Polyoxymethylen (POM) 1947

DuPont startet 1947 ein Forschungsprogramm, welches zu dem Strukturwerkstoff Polyformaldehyd führt.

Polyoxymethylen (POM) wird erstmals 1959 in technischem Maßstab hergestellt und unter dem Namen Delrin[®] vermarktet.



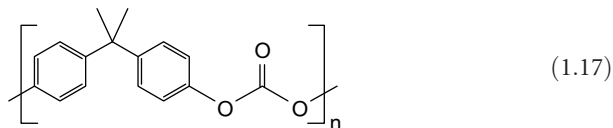
Anwendungen: Gasfeuerzeuge, Zahnräder und Lager für z. B. Uhrwerke, Handprothesen, Reißverschlüsse, ...

Polycarbonat (PC) 1953

Hermann Schnell

H. Schnell, Bayer AG, entwickelt und patentiert die Polycarbonate (PC), welche seit 1958 unter dem Handelsnamen Makrolon[®] kommerziell produziert werden.

Polycarbonate sind heutzutage ebenfalls bekannt als Lexan[®] und Merlon[®].



Anwendungen: Zerstörungssichere Scheiben für z. B. Telefonkabinen, Helmvisiere, Schutzbrillen, Füllfederhalter, Slalomstangen, Einwegspritzen, Babyflaschen, Compact-Disks, ...

DNA-Struktur 1953

James D. Watson (1928)

Francis H. C. Crick (1916)

J. D. Watson und F. H. C. Crick schlagen für die DNA eine Doppelhelix-Struktur vor. Die Ära moderner Zellbiologie beginnt.

Nature 171, 737 (1953)

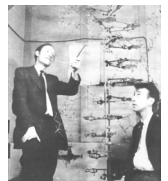
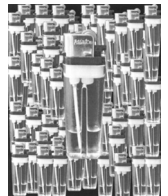
J. D. Watson und F. H. C. Crick erhalten 1962 den Nobelpreis für Medizin

Polymer-Theorie 1953

Paul J. Flory (1919–1985)

P. J. Flory erklärt die Kinetik von Radikal-Polymerisationen mittels Ketten-Transfer-Mechanismus im Jahre 1937.

J. Am. Chem. Soc. 59, 241 (1937)



Im Jahre 1941 formuliert er eine Theorie für polymere Netzwerke, Gelformierung und Wichtigkeit des Gelpunkts.

J. Am. Chem. Soc. 63, 3083 (1941)

Unabhängig von einander entwickeln M. L. Huggins und P. J. Flory eine neue Theorie für Polymerlösungen.

J. Chem. Phys. 10, 51 (1942)

J. Am. Chem. Soc. 64, 1712 (1942)

Flory's Buch „Principles of Polymer Chemistry“, ein Meilenstein der Polymerwissenschaften, wird 1953 publiziert.

Eine Theorie mit fundamentaler Bedeutung für flüssigkristalline Polymere formuliert er 1956.

Proc. Roy. Soc. (London), A 234, 73 (1956)

P. J. Flory erhält den Nobelpreis für Chemie 1974.

Lineare Polyolefine (PE / i-PP) 1953/55



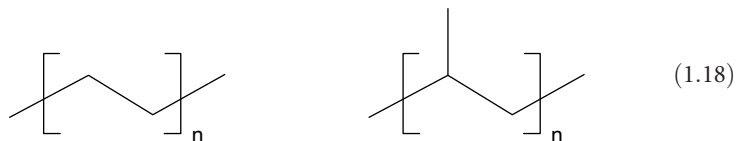
Karl Ziegler (1898–1973)

Giulio Natta (1903–1979)

K. Ziegler synthetisiert 1953 lineares Polyethylen (PE) bei tieferen Temperaturen und Drücken als beim ICI-Verfahren durch Verwendung von spezifischen metallischen Katalysatoren. Produktion von linearem PE beginnt bei Hoechst 1954.

G. Natta und P. Chira berichten 1955 über ähnliche Katalysatoren zur Herstellung von kristallinem, isotaktischem Polypropylen (i-PP). Die italienische Firma Montecatini startet 1957 die Produktion von i-PP.

K. Ziegler und G. Natta erhalten 1963 den Nobelpreis für Chemie.



Dt. Patent 973626 (PE)

J. Am. Chem. Soc. 77, 1708 (1955) (i-PP)

Anwendungen: Überall!!!

Hochfeste Polymerfasern 1965

Stephanie L. Kwolek

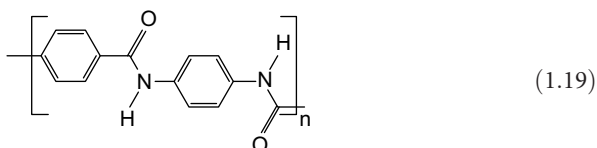
Herbert Blades



S. L. Kwolek, DuPont, synthetisiert 1965 Poly-p-phenylenterephthalamid, ein neues aromatisches Polyamid (Aramid), mit dem Ziel, ein hochtemperaturstabiles Polymer herzustellen. Zu ihrer Überraschung formt dieses in konzentrierter Schwefelsäure-Lösung, auf Grund des steifen molekularen Aufbaus, die von P. J. Flory schon 1956 vorgeschlagene flüssig-kristalline Phase.

H. Blades, DuPont, verarbeitet diese Lösungen in einem speziellen Spinnverfahren, durch welches die steifen Polymerketten orientiert werden, zu Fasern mit außeror-

dentlichen mechanischen Eigenschaften. Eine neue Ära von Hochleistungs-Polymeren und Verbundwerkstoffen beginnt.



U.S. Patent 3600350 (Synthese)

U.S. Patent 3767756 (Spinnverfahren)

Anwendungen: Hochfeste Fasern (para-Form Kevlar[®]), feuerresistente Fasern (meta-Form Nomex[®])

Polymer-Theorie 1971

Pierre-Gilles de Gennes (1932)

P.-G. de Gennes leitet 1971 das so genannte „Reptation-Modell“ für die Beschreibung der schlangenähnlichen Diffusionsbewegung polymerer Kettenmoleküle in der Schmelze her.

J. Chem. Phys. 55, 55 (1971)

Er publiziert 1979 das für die Polymerwissenschaften bedeutende Werk „Scaling Laws in Polymers“, in welchem er Theorien für das Verhalten von Polymermolekülen über, unter anderem, weite Temperatur- und Konzentrationsbereiche, entwickelt.

P.-G. de Gennes erhält den Nobelpreis für Physik 1991.



Elektrisch leitfähige Polymere 1974

Hideki Shirakawa

Alan G. McDiarmid

Alan J. Heeger

H. Shirakawa fügt bei der Polymerisation von Acetylen irrtümlicherweise einen Überschuss (1000-fach!!) an Katalysator zu und erhält in seinem Reaktor einen kohärenten, metallartigen Polyacetylenfilm.

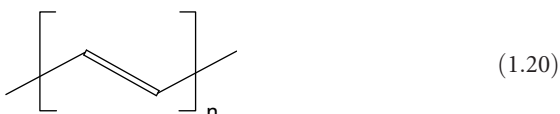
A. G. McDiarmid, A. J. Heeger und Mitarbeiter dotieren den erhaltenen Film mit Iod, wodurch das Polymer 1000000-fach elektrisch leitfähiger wird.

Hideki Shirakawa, Alan G. McDiarmid und Alan J. Heeger erhalten 2000 den Nobelpreis.

J. Polym. Sci. Polym. Chem. Ed. 12, 11(1974) Synthese

J. Chem. Soc. Chem. Commun. 578 (1977) Dotierung

Anwendungen: Antistatische Materialien, Transistoren, Elektroden, flexible elektronische Komponente, elektro-chemische Fenster, Wegwerfelektronik



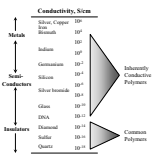


Tabelle 1.1 Elektrische Leitfähigkeiten für anorganische und organische Stoffe (Beispiele)

		Leitfähigkeit in S/cm		
Metalle	Silber, Kupfer, Eisen	10^6	} Eigenständige leitfähige Polymere	
	Bismut	10^4		
Halbmetalle		10^2		
	Indium	10^0		
	Germanium	10^{-2}		
	Silizium	10^{-4}		
	Brom-Silber	10^{-6}		
Isolatoren		10^{-8}		} Gemeinsame Polymere
	Glas	10^{-10}		
	DNA	10^{-12}		
	Diamant	10^{-14}		
	Schwefel	10^{-16}		
	Quartz	10^{-18}		

Ultrahochfeste Fasern (UHMW-PE) 1979

Paul Smith (1951)

Piet J. Lemstra (1947)

P. Smith und P. J. Lemstra, DSM, entwickeln ein neues technologisches Verfahren, „Gel-Spinning“, zur Produktion von ultrahochfesten Fasern aus ultrahochmolekularem Polyethylen, welche zum ersten Mal 1974 von A. J. Pennings durch Kristallwachstums-Methoden hergestellt worden sind.

Diese Fasern sind 50 % fester als Kevlar[®] und bis zu 20mal stärker auf das Gewicht bezogen als Stahl!

Kommerzialisiert unter Lizenz durch Allied Signal (Spectra[®]) 1983, und DSM/Toyobo (Dyneema[®]) 1986.



U.S. Patent 4344908

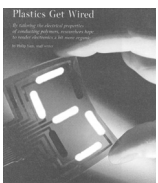
Anwendungen: Schusssichere Westen und Helme, haisichere Fischernetze und Hochleistungsangelschnüre, schneidesichere Chirurgiehandschuhe, Schutzkleidung, das „Papstmobil“, ...

Licht-emittierende Polymere 1990

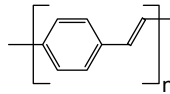
Richard H. Friend

Andrew B. Holmes

R. H. Friend, A. B. Holmes und Mitarbeiter stellen die ersten polymeren Leuchtdioden basierend auf Poly-p-phenylenvinylen her; eine Erweiterung zu den elektronischen



Komponenten von Tang und Van Slyke, Eastman Kodak, aus niedrig-molekularen organischen Verbindungen (U.S. Patent 4885211).



(1.22)

Nature 347, 539 (1990)

U.S. Patent 5247190

Potentielle Anwendungen: Flexible Lichtquellen, Flachbildschirme und -Anzeigen

1.4 Zukunft der Kunststoffe – Prognosen

Wer sich die Erforschung der Zukunft zum Ziel gesetzt hat, muss damit rechnen, sehr bald einmal an Leitplanken zu stoßen oder sich besser noch am Zitat des Nobelpreisträgers Niels Bohr (1885–1962) zu orientieren.

„Prognosen sind schwierig – vor allem wenn sie die Zukunft betreffen“

Wie Bild 1.11 verdeutlicht, steht China nach wie vor unangefochten auf Platz eins (aktuell 31%). Zusammen mit Japan und den restlichen asiatischen Ländern entfällt somit **mehr als die Hälfte der weltweiten Produktion auf Asien**. In Zahlen ausgedrückt produzierte China allein mehr als 100 Mio. t. in 2019. Was Europa betrifft, sank sein Anteil verglichen mit 2013 von 20% auf nur noch knapp 16%.

China allein
mehr als
100 Mio. t.

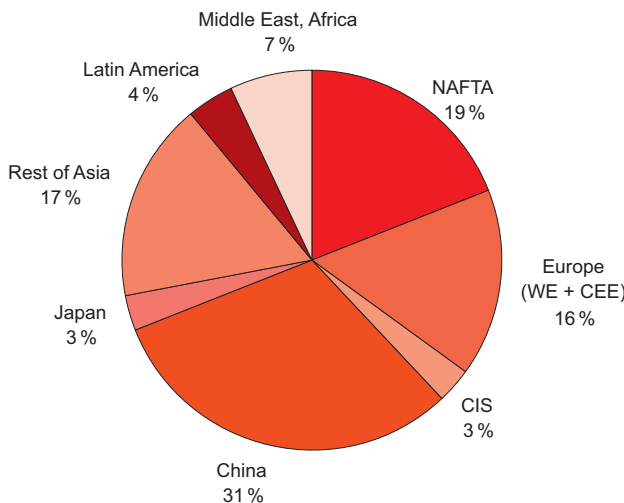


Bild 1.11: Aktuelle Ausgangslage 2019. Weltproduktion von Kunststoff-Werkstoffen nach Regionen (inkl. Duroplaste, Elastomere, Klebstoffe, Beschichtungen, Dichtungsmaterial und PP-Fasern. Nicht enthalten PET-, PA- und PAN-Fasern). WE (Western Europe): EU 15 + CH + N (+ Malta + Cyprus); CE (Central Europe). CIS (GUS): Gemeinschaft unabhängiger Staaten.

Quelle: **PlasticsEurope, Business Data and Charts 2019**

Angesichts der Tatsache, dass es vielfach in der Vergangenheit zu etlichen Fehlprognosen kam (man denke nur an die irrtümliche Voraussage der schwindenden Bedeutung von Kunststoffen wie Polyethylen, PE, oder Polypropylen, PP) oder für 2019: „Künstliche Intelligenz übernimmt die Herrschaft“, sollte daher jede weitere Prognose mit einem gewissen Vorbehalt versehen werden. Wunschenken und Tatsachen sind eben nicht immer kongruent. Nichtsdestotrotz sei der Versuch gewagt, mittels der Prognostik zu einigen Punkten eine oder mehrere Aussagen zu machen.

1.4.1 Zukünftiger Pro-Kopf-Verbrauch von Kunststoff-Werkstoffen

abnehmende
Akzeptanz des
Werkstoffs
Kunststoff

Bild 1.12 entstammt einer Publikation der Chemischen Werke Hüls AG aus den achtziger Jahren des vergangenen Jahrhunderts und beziffert den weltweiten Kunststoffverbrauch im Jahr 2100 auf knapp 800 Mio. t. Verglichen mit der ausgewiesenen Produktion im 2019 scheint diese Zahl aus heutiger Sicht reichlich untertrieben, vgl. Bild 1.4. Nicht untertrieben ist hingegen der weiterhin *schwindende Anteil Europas* an der Weltproduktion von Kunststoffen, verstärkt durch die abnehmende Akzeptanz des Werkstoffs Kunststoff im Alltag der Bevölkerung. Der mittlere Pro-Kopf-Verbrauch in einigen Industrie-Ländern liegt aktuell bei einem Wert von rund 100 kg/Jahr und wird vermutlich - was Europa betrifft - im besten Fall dort verharren. Ausgehend von den vorliegenden Fakten wird somit das wirtschaftliche Wachstum in Asien jegliche Art von Prognosen massiv beeinflussen. Eine exakte Vorhersage für den zukünftigen Pro-Kopf-Verbrauch auf längere Sicht bleibt infolgedessen im Dunkeln. Gesichert scheint „als Trost“ lediglich die berechtigte Annahme, dass bis Ende dieses Jahrhunderts die im Bild 1.12 prognostizierten 800 Mio. t. längst erreicht sind oder sogar bereits die Milliardengrenze überschritten wurde.

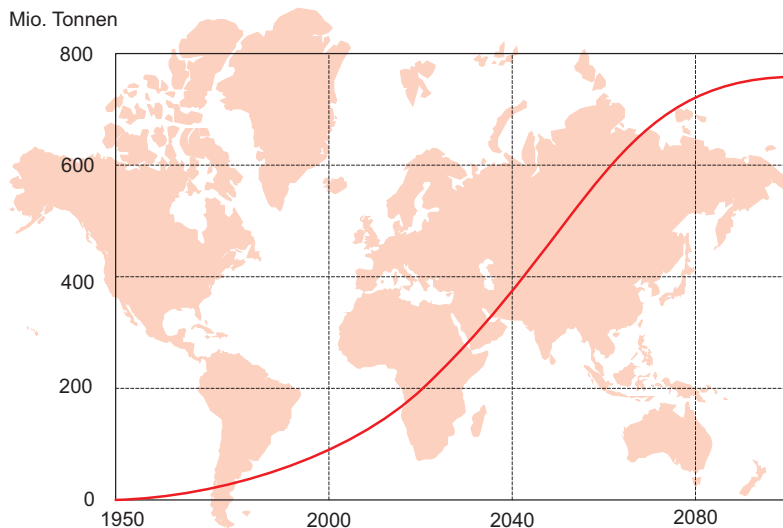


Bild 1.12: Welt-Kunststoff-Verbrauch (nach Teitge)

Quelle: Chemische Werke Hüls AG

1.4.2 Erwartungen an Polymere

Ausgewählt aus unterschiedlichen Forschungsgebieten finden sich nachfolgend Themen in denen aufgezeigt wird, mit welchen Entwicklungsschritten in den nächsten ein bis drei Jahrzehnten zu rechnen sein wird. Dementsprechend kann diese Auswahl als rein zufällig bezeichnet werden und kann einzig den Anspruch erfüllen: Neben wissenschaftlicher Neugierde zu wecken, die Chemie als Multitalent zur Erfüllung der Ansprüche im Leben eines modernen Menschen zu schätzen

Chemie als
Multitalent

Mikrobielle Ökologie

- Mit der Sesshaftigkeit der Menschheit vor rund 10'000 Jahren ging die Nutzung der Landwirtschaft und Viehzucht einher. Dabei lernte der Einzelne im Laufe der Zeit Mikroorganismen (Pilze u. a. Hefen sowie Bakterien) vermehrt als Helfer für neue Nahrungsquellen zu gebrauchen, z. B. Gärung; in neuerer Zeit biologische Kläranlagen. Extrapoliert aus modernen mikrobiologischen Forschungsergebnissen lautet das Schlagwort: *Mikroben für neue Wege zur biologischen Sanierung von Abfallstoffen, incl. Plastikmüll*. Die stoffliche Entsorgung von schwer abzubauenen Kunststoffen wie Polyethylen, PE, oder Polypropylen, PP, (beide aus Kohlenstoffketten garniert mit Wasserstoffatomen bestehend) zeitigte bereits erste Erfolge. Der Durchbruch gelang mit Hilfe neu entdeckter Bakterien und Pilze, deren Enzyme in der Lage sind auch nicht Sauerstoff enthaltende Makromoleküle abzubauen zu können bzw. für ihren eigenen Stoffwechsel zu nutzen, z. B. *Bacillus subtilis*. Vice versa: Mikroben zur Herstellung von neuartigen echten Bio-Kunststoffen, vgl. Abschnitt 1.4.3.

Mikroben

4D(t)-Druck

- Vergleichsweise mit einem Kinderluftballon, der nur aufgeblasen Sinn macht, existieren für Kunststoffe durch entsprechende Vorbehandlungen seit langem ähnliche Möglichkeiten, z. B. für Schrumpfschläuche in Kombination mit *zeitabhängiger (t) Wärmezufuhr* von außen. Der „kleine“ Unterschied: Irreversibel bei Schrumpfschläuchen! Infolgedessen stellt sich die Frage ob für feste Bauteile oder Halbzeug aus Kunststoff die gleiche oder sogar eine verbesserte *Reversibilität* im Vergleich mit dem Gummiballon möglich ist? Was den 4D(t)-Druck an dieser Stelle besonders attraktiv macht, resultiert aus der nahezu unbegrenzten Formenvielfalt dank dem 3D-Druck. An Anwendungen für diese revolutionäre Art des 3D-Drucks in großem Stil besteht kein Mangel. Beispielsweise die reversible Fertigung platzsparender Teile bis zu ihrem Gebrauch mit vergrößertem Volumen und zurück; evtl. auch in Kombination mit bereits vorhandenen Formgedächtnispolymeren. Trotz erster erfolgversprechender Entwicklungen verbleibt hier noch ein offenes Forschungsfeld oder anders ausgedrückt: es lässt sich ein enormes Entwicklungspotential für ausgereifte Produkte orten, vgl. Abschnitt 3.5.11.5.

zeitabhängiger(t)
Wärmezufuhr

Formgedächtnispolymeren

Neue Arten zur Nutzung der Sonnenenergie

- Mit der vermehrten Nutzung der Sonnenenergie beschäftigen sich seit längerer Zeit weltweit viele Institute. Vielversprechend tönen Verfahren, bei denen sich der Klimasünder CO₂ dank seines Gehalts an Kohlenstoff unerwartet als ein begehrter Rohstoff der Zukunft entpuppt. Voraussetzung dafür ist (einer Lupe ähnlich) beispielsweise die Fokussierung des Sonnenlichts zur Nutzung als extrem heiße Energiequelle in Kombination mit CO₂ und Wasser. Ein an der ETH Zürich entwickeltes und bereits erprobtes Verfahren basiert auf CO₂ und H₂O aus der Luft, bei 1500 °C chemisch in einem Solarreaktor zu *Syngas* umgewandelt, einer Mischung aus H₂ und CO. Diese durch die Fischer-Tropsch-Synthese bereits bekannte Gasmischung, angereichert mit zusätzlichem H₂ sowie in Anwesenheit von Katalysatoren reagiert vorwiegend zu Alkanen und Alkenen

Syngas

Kunststoff aus
Luft

im Benzinbereich unter Abscheidung von Wasser. Von dort aus ist der Weg zur Erzeugung von *Kunststoff aus Luft* in Anlehnung an das Schlagwort *Benzin aus Luft* technisch kein Problem, vgl. Abschnitt 1.4.3.



Nanotechnologie

- *Personal Manufacturing Units (PMU)*, auch als „persönliche Fertigungseinheiten“ bezeichnet, ermöglicht jedes gewünschte Produkt mit Hilfe eines dem 3D-Druck ähnlichen Verfahren zusammenzubauen. Allerdings mit dem Unterschied, dass sich das Baumaterial auf atomarer Ebene wiederfindet, d. h. einzelne Atome zur Fertigung dienen. Zugleich könnte hierdurch das Abfallproblem elegant gelöst werden, indem das Produkt nur für einen gewünschten Zeitraum gefertigt wird. Nach Ablauf der im Voraus definierten Zeitspanne übernimmt das *reverse manufacturing*, „Rückentwicklung“ die Aufgabe das nanotechnologische Produkt wieder in seine Atome zu zerlegen und dementsprechend ohne Umweltbelastung zu entsorgen, vgl. Abschnitt 15.3.

*reverse manu-
facturing*,
„Rückentwicklung“
ohne Umwelt-
belastung

Supraleitersubstanz (Polymer?)

- Es wird eine Supraleitersubstanz (Polymer?) entwickelt, deren Sprungtemperatur bei Normaltemperatur liegt; erwarteter Zeitraum 2021 bis 2025. Diese Aussage entstammt „Delphi 98“, einer Studie im Auftrag des deutschen Bundesministeriums für Bildung, Wissenschaft und Forschung (BMBF), die schon in früheren Auflagen dieses Buches jeweils an dieser Stelle zitiert wurde. Wobei zu bemerken ist, dass „Delphi 98“ in vielen Vorhersagen richtig lag, vgl. Abschnitt 15.1.

Sprungtem-
peratur bei
Normal-
temperatur

Das zukünftige Puzzle mit den chemischen Elementen:

- Zumindest aus Sicht der theoretischen Chemie besteht kein Einwand neben den bisherigen auch noch weitere chemische Elemente (s. Periodensystem) für zukünftige Entwicklungen im Bereich der Kunststoffe bzw. bei den Polymeren einzubinden. Beispielsweise vermehrt die seltenen Erden und Halbmetalle oder im Extremfall sogar die Edelgase (s. Argon-Schweißen). Es bleibt daher für Spannung weiterhin gesorgt, vgl. Anfang Kapitel 2.

Extremfall
sogar die
Edelgase

Grüne Chemie

- Ursprünglich nicht vorgesehen, doch aus aktuellem Anlass wird an dieser Stelle ein Thema aufgefrischt, das bereits seit Jahrzehnten der chemischen Industrie den Weg weist und bei der laufenden „Plastik-Diskussion“ fast nie zu Wort kommt. 1998 formulierten und veröffentlichten Paul Anastas und John Ch. Warner „12 Grundprinzipien der Grünen Chemie“ (12 Principles of Green Chemistry). Im Zentrum steht das Bemühen die Umweltverschmutzung einzudämmen, die Energieeffizienz zu steigern um schlussendlich möglichst umweltverträglich zu produzieren. Da die Beseitigung noch besser Vermeidung von Abfällen sowie die Energieeffizienz zu optimieren nicht zuletzt im ureigenen Interesse liegt, stießen diese Leitsätze auch bei der kunststofferzeugenden Industrie auf offene Ohren. Äußerliches Merkmal ist der „Wöhler-Preis für Nachhaltige Chemie“, der durch die Gesellschaft Deutscher Chemiker (GDCh) seit 1998 jährlich verliehen wird. Anfänglich unter dem Namen: „ressourcenschonende Prozesse“. Vieles wurde in der Zwischenzeit getan. Indes bleibt auch hier noch viel zu tun, vgl. Kapitel 16 und 17.

12 Principles
of Green
Chemistry
Vermeidung
von Abfällen
Energieeffizienz
zu optimieren

Klebstoffe, Beschichtungen (inkl. Farben und Lacke), Dichtungsmaterial und Fasern (beispielsweise aus Polyamid, PA, oder Polypropylen, PP)

- Der Schlussreigen gebührt an dieser Stelle der unglaublichen Vielfalt an Polymeren, die hier Verwendung finden. Auch wenn aus Platzgründen diese Stoffklassen nicht

detailliert in diesem Buch erläutert werden können, so mindert dies in keiner Weise ihre fundamentale Bedeutung als unverzichtbare Materialien in diesen Bereichen. Es erstaunt daher nicht, dass gerade hier die Erwartungen an neue Polymere auf eine große Nachfrage stoßen, die vorgängig aus Forschungsprojekten hervorgehen. Als Musterbeispiel diene zum Schluss eine aktuelle Publikation zum Thema: außergewöhnlicher Schutz für die Aluminium-Legierung (AA2024) gegen Korrosion auf der Basis von Polyphenylenmethylen (PPM). Das Polymer leuchtet (fluoresziert) an den Stellen, wo es nicht beschädigt ist, *repariert sich selbst* – und ist mehrfach wiederverwendbar; siehe Literaturverzeichnis.

1.4.3 Zukünftige Rohstoffquellen

Die organische Basis der Kunststoffe wird auch in der Zukunft jegliche Strategie zur Erschließung neuer Rohstoffquellen bestimmen. Betrachtet man das Erdöl als letztes Glied einer Kette organischer Prozesse (entstanden aus dem marinen Plankton/Faulschlamm in vorgeschichtlicher Zeit), so stellt sich – technologisch gesehen – die Frage, inwiefern die Menschheit nicht eines Tages in der Lage sein wird, diesen „Alterungsprozess“ von Organismen künstlich zu beschleunigen, d. h. aus in der Natur vorhandenen organischen Verbindungen ebenfalls Erdöl oder dem Erdöl ähnliche Verbindungen kostengünstig herzustellen.

Eine weitere Perspektive ergibt sich aus den rasch fortschreitenden wissenschaftlichen Erkenntnissen der modernen Biologie inklusive Bio- und Gentechnologie, die vielleicht direkt zu geeigneten Rohstoffen für die Kunststoffherzeugung führen. Erste Erfolg versprechende Ergebnisse liegen bereits seit Jahren vor. So wird sowohl von Bakterien (*Alcaligenes eutrophus*) wie auch von Pflanzen (*Arabidopsis thaliana*) Polyhydroxybutyrat hergestellt, d. h. „ein technisches Polymer“ natürlichen Ursprungs, vgl. Abschnitt 15.5.2 und 16.4.1.

Nicht zuletzt sei an die Photosynthese, den wichtigsten biochemischen Vorgang auf der Erde, erinnert (jährlich gespeicherte Menge: 1,5 bis $2 \cdot 10^{11}$ t Kohlenstoff aus dem Kohlendioxid in der Luft). Bei diesem chemischen Prozess erfolgt die Umwandlung von Kohlendioxid und Wasser in so genannte Kohlenhydrate unter Einfluss des Sonnenlichts durch grüne Pflanzen und gewisse Bakterienarten. Die ablaufende chemische Reaktion kann schematisch mit folgender Summengleichung beschrieben werden:

Photosynthese



Auf den ersten Blick scheint nach der so dargestellten Gleichung die Photosynthese sehr einfach zu sein. Doch im Detail handelt es sich um einen bis heute erst teilweise erforschten Mechanismus (vergleichsweise wäre die Verwandlung eines Mineralwassers in eine süße Limonade vorläufig nur als amüsanter Zaubertrick möglich). Dennoch wird die vollständige Aufklärung der ablaufenden chemischen Reaktionen nur eine Frage der Zeit sein und damit in naher oder ferner Zukunft eine weitere Rohstoffbasis für Kunststoffe ermöglichen. Alle hier aufgezeigten Alternativen zum Erdöl bzw. Erdgas bestechen zudem durch die Tatsache, dass zu ihrer Verwirklichung auch *rohstoffarme Länder* – zumindest theoretisch – in der Lage sein sollten. Was die „materiellen Rohstoffe“ zu diesen neuartigen Totalsynthesen von Kunststoffen betrifft, so sind die dafür erforderlichen Ressourcen (CO_2 , H_2O , Sonnenlicht) fast überall auf der Erde vorhanden. Ganz zu schweigen von dem Reservoir an Stickstoff (N_2) und Sauerstoff (O_2) in der Luft, vgl. Kapitel 2, 8 und 9.

Chance für rohstoffarme Länder

Autopionier
„Henry Ford“

Abschließend sei der amerikanische Auto-Pionier Henry Ford zitiert, der bereits in den dreißiger Jahren des letzten Jahrhunderts davon träumte, „einen Wagen wie eine Feldfrucht wachsen zu lassen“. Er war ein leidenschaftlicher Anhänger der „Farm Chemurgy“-Theorie des Chemikers William J. Hale (von engl. „Farm“, „chemistry“ und griech. *érgon* „Arbeit“), die besagte, dass die Ersetzung des Pferdes durch den Verbrennungsmotor, der keine Zellulose fraß und keinen nützlichen Dünger an den Boden zurückgab, ein riesiges Unglück für die Landwirtschaft bedeutete. Henry Ford – 1863 auf einer Farm geboren und dort aufgewachsen – wendete in der Folge erhebliche finanzielle Mittel auf, um in eigenen Forschungslaboratorien seines Autokonzerns das industrielle Potenzial von Pflanzen untersuchen zu lassen. Aus den „drei Musketieren in der Natur“, Zellulose, Pflanzenöl und Alkohol, sollten nach seiner festen Überzeugung Rohmaterialien entstehen, die sich in hervorragender Weise zur Autoherstellung eignen. Tatsächlich entwickelten seine Ingenieure den Prototypen eines Plastik-Ford, der im November 1940 den Weg in die Öffentlichkeit fand. Karosserie und Innenraumverkleidung des Prototyps bestanden zu 100% aus einem Biokunststoff (Basis: Sojabohnenöl und Cellulose) und als Treibstoff wurde aus Hanf erzeugtes Methanol eingesetzt.

Agro-Plastik
kontra Metall-
Karosserie

Die Überlegenheit seiner Agro-Plastik gegenüber der althergebrachten Metall-Karosserie demonstrierte Henry Ford eigenhändig, indem er das Heck seines Plastik-Ford mehrfach mit einer Axt bearbeitete und es trotzdem unbeschädigt blieb. Zugleich forderte er die Anwesenden auf, mit ihrem Auto dasselbe zu tun, vgl. Bild 1.13.



Bild 1.13: Von Blech zu Plastik: Henry Ford bearbeitet die Kunststoff-Karosserie mit der Axt
Quelle: *The Henry Ford Museum & Greenfield Village*

Plastik-Ford

Auch wenn seinem Plastik-Ford nicht der Erfolg vergönnt war, den er sich davon erhoffte, so hat doch die Vision eines Henry Ford, die Aussöhnung der beiden

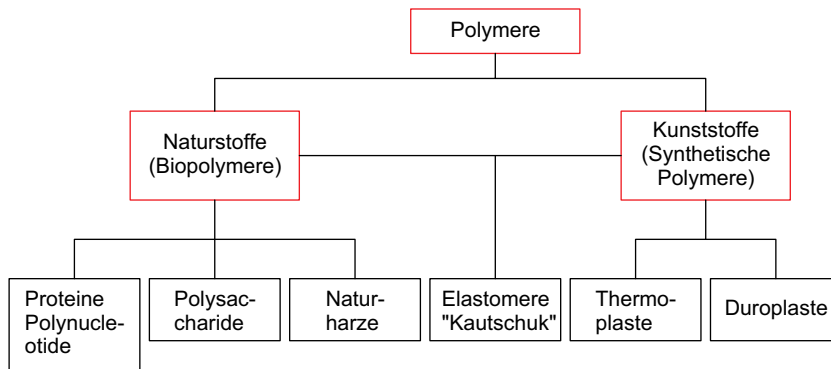


Bild 1.14: Klassifizierung der Polymere nach ihrer Herkunft

Seelen in seiner Brust – des Mechanikers und des Naturfreunds – von ihrer Aktualität bis heute nichts eingebüßt.

Die Vision eines Henry Ford erhält zudem ihre absolute Berechtigung aus der Identität im molekularen Aufbau, die sich beim Vergleich zwischen Naturstoffen und Kunststoffen feststellen lässt. Ob Proteine, Polynucleotide (Eiweiße), Polysaccharide (Zellulose, Stärke) oder Naturharze, bei all diesen Naturstoffen handelt es sich um Biopolymere, vgl. Bild 1.14.

Eine Sonderstellung erfahren dabei die Elastomere, da sie ihrer Herkunft nach sowohl Abkömmlinge von Naturstoffen („Naturkautschuk“) als auch Produkte vollsynthetischen Ursprungs („Synthesekautschuk“) sind.

Gleichzeitig soll in diesem Zusammenhang ein exklusives Einsatzgebiet der Kunststoffe nicht unerwähnt bleiben. Zum einen repräsentieren die Kunststoffe heute eine bedeutende Klasse technischer Werkstoffe (z. B. im modernen Automobil- und Flugzeugbau), zum anderen kommt ihnen das Privileg zu, aufgrund ihrer molekularen Struktur die höchste Kompatibilität mit Polymeren der belebten Natur zu besitzen. Auch in dieser auserlesenen Mittlerfunktion zwischen toter und lebendiger Materie (z. B. für Haut-/Organersatz in der Medizin) haben Kunststoffe ihre ganz große Zukunft noch vor sich. Oder vereinfacht ausgedrückt: Das Ende der Fahnenstange ist noch lange nicht erreicht.

Polymere: Basis von Natur- und Kunststoffen

1.5 Wirtschaftsdaten und Grafiken zu Kunststoffen

1.5.1 Einteilung der Kunststoffproduktion nach Typ und Bedarf in Einsatzgebieten

Wie aus Bild 1.15 ersichtlich, entfallen rund 71% der weltweiten Produktion auf fünf Kunststofftypen, davon alleine rund 46,5% auf die Polyolefine (PE und PP), gefolgt von Polyvinylchlorid (PVC), den Polystyrolen (PS & PSE) und dem Polyethylenterephthalat (PET) als Flaschenmaterial.

71% der weltweiten Produktion

Sachwortverzeichnis

A

- Abbau von Polymeren 71
- Abbaureaktion 128
- Abbindemechanismus der Klebung 243
- Abfallhierarchie 596
- Abfallwirtschaft 596
- abgewandelte Naturstoffe 12
- ABS + PA Blends 340
- ABS + PC Blends 339
- Abwandlung durch Vernetzen 269
- Acetal 414
- Acetal-Thermoplaste 411
- Acetat-Reyon 373
- Acetylen 298, 555
- Acrylatcopolymer 617
- Acrylfaser 20
- Acrylglas 366
- Acrylkunststoff 16
- Acrylnitril 328, 401
- Acrylnitril-Butadien-Kautschuke NBR 515
- Acrylnitril-Butadien-Styrol ABS 333, 335
- Acrylnitril-Methylmethacrylat AMMA 367
- Acrylnitril-Styrol-Acrylat ASA 337
- Acrylsäuremethylester 365
- ACS 337
- Additionspolymerisation (Polyaddition) 45, 67
- Additive 40, 104, 151, 516
- Additive Fertigungsverfahren 216
- Adhäsion 241
- AES 337
- Agro-Plastik 30
- AHA-Schutz 589
- Aktivator 521
- akzessorische Verunreinigungen 129
- Allophanat-Gruppe 548
- Allophanensäure 548
- Allylgruppe 476
- alternierendes Copolymer 56
- Alterung 128
- Alterungsschutz 128
- Alterungsschutzmittel 521
- Alterungsvorgänge
 - chemische 128
 - physikalische 131
- Amid-imid-Gruppe 497
- Amidgruppe 381, 390
- Amin 545
- ω -Aminocarbonsäuren 382, 387
- Aminogruppe 63
- Aminoplaste 451
- 11-Aminoundecausäure 383
- amorph 41, 44, 91, 118, 397, 488, 503
- amorphes Polyamid 397
- amorphes Polyethylenterephthalat PET-A 351
- Amylopektin 573
- Amylose 573
- Animationen zu V
 - Birkenpech 11
 - Blasfolienanlagen 166
 - Carbon Nanotubes (CNT) 568
 - Compoundieren 152
 - Elastomeren/Gummi 514
 - Epoxidharzen 467
 - Erzeugung von PVC-Polymeren 302
 - Extrusionsanlagen 165
 - Extrusionsblasformanlagen 169
 - Funktion von Leuchtdioden 562
 - FVK-Urformen 201
 - PA 382
 - Phenolharzen 444
 - Photovoltaik 563
 - Polykondensation 66
 - Polymerisation und PMMA 364
 - PS-E Schaumstoffen 536
 - PTFE 423
 - PUR-Schaumstoffen 540
 - radikalischer Polymerisation 50
 - Schäumen 206
 - Spritzgießen 173
 - Spritz-Streckblasformen 172
- Anion 51
- anionische Kettenpolymerisation 52
- Anisotropie 102, 107, 489
- antiadhäsiv 425, 429
- Antioxidantien 108, 129
- Antiquietscheffekt 329
- Antistatika 109, 109
- Aramid 459, 491
- Aramid-Faser 193
- aromatische Dicarbonsäure 485
- aromatische Hydroxycarbonsäure 485
- aromatische Polyamide 491
- aromatischer Polyester 347, 485
- Arrhenius-Gleichung 158
- Arylimid-Gruppe 497

- ASA + PC Blends 339
 ataktisch 88
 ataktisches Polystyrol 322
 Atom 38
 Atombindung 39, 72 f.
 äußere Alterungsursachen 128
 äußere Weichmachung 107
 äußerer Weichmacher 307
 Aufbau eines Extruders 161
 Aufbereiten (Compoundieren) 104, 145 f., 302
 Aufbereitungsverfahren 152, 302
 Aufspießen 490
 Aushärten 57 f.
 Autoxidation 129
 Autoxidationszyklus 130
 Avogadro-Konstante 40
 Azeotropkondensation 69
 Azodicarbonamid 534
 Azo-Verbindung 534
- B**
- Bakterien 604
 Barriere-Kunststoffe 127, 316, 396, 400
 Batch-Reaktor 62
 Bauarten des Kalenders 186
 Baumwolle 371
 Bedampfen 251
 Bedrucken 248
 Beflocken 252
 Begasung 533
 Beibehaltung des Polymerisationsgrads 70
 Benzidin 497
 Benzolring 324
 Benzoylperoxid 464
 Beschichten 145, 245 f.
 Beschleuniger 57, 441, 463, 521
 besonders schlagfestes Polyvinylchlorid
 PVC-HI 305
 Bestrahlen 254
 Biegeumformen 226
 Bigbags 146
 Bi-Katalysatoren 267
 Billigplastik 33
 bimodale Molmassenverteilung 99
 Bindungen, physikalische 75
 Bindungsabstände 73
 Bindungsenergie 73 f., 76
 Bindungskräfte 72
 Biocide 529
 Biocomposites 571, 577, 578
 biogene Inhaltsstoffe 418
 Biokompatibilität 570
 Biokunststoffe 571
 Biomaterialien 570
 Bionik 569
 Bioplastics 571
 Biopolyamide 398, 578
 Biopolymere 30, 571
 Bioprinter 222
 Bioreaktor 575
 1,1-Bis(4-hydroxyphenyl)-3,3,5-trimethyl-
 cyclohexan BPTMC 360
 biotechnologische Verfahren 603
 Bisphenol A (BPA) 356, 357, 466, 470
 Bisphenol S 360
 Bisphenol TMC 360
 Biuret-Gruppe 547
 Blasfolienanlage 166
 Blasformen 168
 Blend 339 f.
 Blister-Verfahren 230
 Blockcopolymer 53, 56, 522
 Blockschaumstoffe 544
 BMC 184, 460
 Bohren 234
 Brandschutzmittel 109
 breite Molmassenverteilung 97
 Brennstoffzellen 565
 Brennwert 608
 Butadien 519
 Butadien-1,3 330
 Butadien-Styrol-Kautschuk 330, 515
 Butan 535
 Butanol 535
 Butylacrylat 303
 Butylenglykol 462
 Butylhydroxytoluol BHT 132
 Butylkautschuk 515
- C**
- C-Faser 459
 C=C-Doppelbindung 47
 ε-Caprolactam 383, 397
 CAP 347
 Carbamid 452
 Carbamidsäure 535
 Carbanion 52
 Carbeniumion 51
 Carbonsäureamidgruppe 381
 Carboxylgruppe 63, 482
 Carothers-Gleichung 66
 CB 347
 Celluloseacetobutyrat CAB 369
 Cellophan 573
 Cellulosewerkstoff 572
 Celluloid 15, 372
 Cellulose 71, 370
 Celluloseacetat CA 369
 Celluloseacetopropionat CAP 369
 Cellulosebutyrat CB 369
 Celluloseester CA, CP, CAB 369 ff.
 Celluloseether 572
 Cellulosepropionat CP 369

- Chargenkessel 58
Chemiefasern 9, 188 ff.
Chemikalienbeständigkeit 126
chemisch abbindende Klebstoffe
(Reaktionskleber) 243
chemische Beständigkeit 125
chemische Bindung 72
chemische Elemente 6, 38
chemische Struktur 81
chemische Verbindungen 38
chemische Vernetzung 44, 57, 86, 121, 513
chemischer Alterungsvorgang 128
chemisches Modifizieren 100
chemisches Recycling 602
chemisches Treibverfahren 203
Chlorieren 307
chloriertes Polyethylen PE-C 314 f.
chloriertes Polyvinylchlorid PVC-C 306
Chlorierung 71
1-Chlor-2,3-epoxypropan 469
Chlor-Kunststoffe 295
Chloropren-Kautschuk 515
chlorsulfoniertes Polyethylen CSM 270
Chlortrifluorethylen 436
Chromophore 130
chrono-mechanisches Verhalten 122
cis-Butendisäure 462
Citronensäure 534
Clarifier 110
CNT, Nanoröhren 567
Cobaltsalze 464
Codierungssystem 614
Coextrusion 166, 170
Comonomere 55
Compatibilizer 102
Composites 106
Compoundieren 144, 302
Compression-RTM-Verfahren 200
Copolymere 55
Copolymerisation 101
Copolymerisat 55
Cossee-Arlman-Mechanismus 54
Crazes 296
Crazing 296
CR-Typ 285
Cyanatesterharz 477
cycloaliphatische Polyamide 392
cycloaliphatisches Epoxidharz 472
Cycloalkan 535
Cyclohexan-1,4-dimethylol (CHDM) 353
1,4-Cyclohexandimethanol 354
Cyclohexanonperoxid 464
Cycloolefin-Copolymere (COC) 271
Cyclopentan 535
- D**
- Datenspeicher 560
Dehnung 122
Dehnviskosität 266
Dehydrierung 330
Dendrimere 110
Dendrimermolekül 43
dendronisierte Polymere 44
Denisov-Zyklus 133
Depolymerisation 85, 414, 426
Devulkanisationsverfahren 518
Di-Hydroxymethylharnstoff 453
Diallylphthalat 463
Diamin 382, 388 ff., 500
3,3'-Diaminobenzidin 499
4,4'-Diaminodicyclohexylmethan PACM
394
4,4'-Diamino-diphenylether 497
Diblockcopolymer 56
Dibutylzinn-dilaurat 544
Dicarbonsäure 382
Diene 519
Diethylentriamin 473
Differential-Scanning-Calorimetry DSC
137
Differentialthermo-Analyse DTA 136
Diffusion 127
Digital Light Processing (DLP) 219
Diglycidether 470
1,4-Dihydroxybenzol (Hydrochinon) 50,
493
diisocyanat 532, 545
Diisodecylphthalat DIDP 310
Diisononylphthalat DINP 310
Dilatanz 112
Dimeres 64
Dimethylanilin 464
Dimethylether 535
2,6-Dimethylphenol 419
3,3 Dimethyl-p-diaminodicyclohexylmethan
MACM 394
Diol 349
Dioxolan 415
Diphenole 485
Diphenylcarbonat 358
Diphenylether-Gruppe 482
Diphenylketon-Gruppe 482
Diphenylmethan-4,4'-diisocyanat, MDI
497, 547
Diphenylsulfid-Gruppe 482, 506
Diphenylsulfon-Gruppe 482, 503
Dipol 74
Dipol-Dipol-Kraft 77
Direkt-Veresterung 349
Disaccharid 572
dispergiert 331
Dispersionskräfte 77
dispersives Mischen 153
Disproportionierung 50
distributives Mischen 153

- DMC 184, 460
 DNA-Struktur 21
 Dodecandisäure 383
 Doppelbindung 46, 57
 Doppelschneckenextruder 162
 Dotierung 555
 Drahtummantelungsanlage 168
 Drehen 234
 Dreiblockcopolymer 530
 Drop-in Biokunststoffe 579
 3D-Drucken 217
 Druckverformungsrest 518
 Drug-Delivery-System 10
 Dry-Blends 154, 312
 Dry-Jet-Wet-Spinnen 193
 Dryblend-Verfahren 312
 Dünnschichtkondensation 69
 Dünnschliff 140
 Dünnschnitt 140
 Durchflussskessel 58
 Durchflussrohr 58
 Duroplaste 41, 44, 121, 159, 441
 Dynamisch-Mechanische Analyse DMA 136
- E**
- e-Methanol 417
 E-PVC 300
 Einbetten 216
 Einfrieren 103
 Einfriertemperatur 121, 311
 Einschneckenextruder 161
 Einteilung der Nebenvalenzbindung 76
 Elastizitätsmodul 122
 Elastomere/Gummi 41, 121, 159, 513–514
 – permanent vernetzte 514 f.
 – reversibel vernetzte 521 f.
 Elastomerlegierung 522
 Elektrete, Polymere 557
 elektrisch leitfähige Compounds 554
 elektrisch leitfähige Polymere 23
 Elektroaktive Kunststoffe 553
 Elektrodekantieren 428
 Elektrolumineszenz 561
 Elektronegativität 74
 Elektronenbeschleuniger 255
 Elektronenpaarbindung 73
 Elektrosinnen 193
 Emulgator 59, 543
 Emulsion 59
 Emulsionspolymerisation 59
 Emulsions-Polyvinylchlorid E-PVC 299
 Endgruppe 83
 Endgruppen-Stabilisierung 415
 enerfy 605
 energetische Verwertung 599
 Energiebedarf 6
 Energiebilanz 609
 Energienutzungsgrad 608
 enge Molmassenverteilung 97
 engmaschige Vernetzung 44
 Entformungsmittel 110
 Entropie 89
 entropie-elastisch 112
 EPDM 284, 515
 Epichlorhydrin 466, 469
 Epoxid 20, 68
 Epoxidharz EP 467 ff.
 Erdöl 29
 Ermüdungsschutzmittel 521
 Erweichungstemperatur T_g 118
 Essigsäure 372, 493
 Essigsäureanhydrid 493
 Ester 347
 Ester-imid-Gruppe 497
 Estergruppe 347
 Ether-imid-Gruppe 497
 Ether-Thermoplast 411
 Ethylen 261
 Ethylen-Chlortrifluorethylen-Copolymer
 ECTFE 433, 436
 Ethylen-Copolymere 271
 Ethylen-Copolymere mit α -Olefinen 267
 Ethylendiamin 547
 Ethylenglykol 349, 462
 Ethylenoxid 348, 415
 Ethylen-Ethylacrylat-Copolymere (EEA)
 273
 Ethylen-Polymerisate, modifizierte 269
 Ethylen-Propylen-Kautschuk EPM 284
 Ethylen-Tetrafluorethylen-Copolymere ETFE
 433
 Ethylen-Vinylacetat-Copolymere (EVAC)
 272
 Ethylen-Vinylalkohol-Copolymere (EVOH)
 274
 Extender 107
 externe Gleitmittel 302
 Extruder 160
 Extruder-Schaumstoff 537
 Extrudieren (Strangpressen) 160 ff.
 Extrudierwerkzeug 163
 Extrusions-Streckblasformen 171
 Extrusionsanlage 160
 Extrusionsblasformen 169
- F**
- Fällungspolymerisation 59
 Farbmittel 107, 151
 Farbpigment 108
 Farbstoff 108
 Faserorientierungswinkel 198
 Faserspritzen 198
 Faserverstärkte Kunststoffe, FVK 197
 Faserwickeln 198

FCKW/Fluorchloralkane 543
 Ferroelektrische Polymere 558
 Fertigungsverfahren 143
 Festkörperstruktur 89
 Festphasenkondensation 350
 FFS-lines 231
 Fibrille 492
 Filmgießen (Foliengießen) 215
 flammhemmende Zusätze 109
 Flammschutzmittel 109
 flammwidrig 296
 Fließhilfe 110
 Fließtemperaturbereich 119
 Fließverhalten 95, 111
 Fluidinjektionstechnik 179
 Fluor-Elastomere 437
 Fluor-Kunststoffe 425
 Fluor-Thermoplaste 431, 437
 Fluorchlorkohlenwasserstoff, FCKW 535
 Flüssigkristalline Polymere LCP 488
 Form-/Werkstoff 41
 Formaldehyd 414, 448, 452
 Formgießen 388
 Formmasse 41, 151
 Formmassen 588
 Formschaumstoffe 544
 Formstoffe 151
 Formteil 159
 Fräsen 234
 Fügen 145, 235
 Fulleren 569
 Füllstoffe 105, 151, 521
 Fungistatika 105, 529
 funktionalisierte Polymere 560
 funktionelle Gruppe 63
 Funktionskunststoffe 560
 Funktionswerkstoffe 7
 Fused Deposition Modeling (FDM) 220
 Fused Layer Modeling (FLM) 220
 FVK-Urformen 197

G

Galvanisierbarkeit 334
 Galvanisieren 251
 Gebrauchsadditive 104
 Gelcoat 201
 Gelcoat-Harze 463
 Gele 560
 Gelelektrophorese 584
 Gelieren 310
 Gel-Spinnen 192
 Gelierprozess 246
 gemischtzellig 201
 Geschichte der Kunststoffe 11
 geschlossenzellig 201
 Gesundheitsaspekte 587
 gesättigte Polyester 64, 348

Gewichtsmittel 98
 Gewindeschneiden 234
 Gießen 212
 Gießharz 442
 Glas 459
 Glasfaser 106
 Glastemperatur T_g 118, 311
 Glasübergangstemperatur T_g 121
 Gleichgewichtsreaktionen 62
 Gleitmittel 110, 151
 Glucose 371
 Glycidester 470–471
 GMC 460
 GMT 185
 Granulieren 155
 Graphen 568
 Grenzflächenkondensation 68, 359
 Grundlagen des Spinnprozesses 189
 Grüne Chemie 28
 Gummi 121, 514 ff.
 Gummi-Schaumstoffe 551
 Guss-Polyamid 388

H

Haargel 584
 Haftvermittler 170
 Halbacetal 414
 Halbzeug 159
 HALS, HAS 133
 Hamsterrad 618
 Handlaminieren 200
 Harnstoff-Formaldehyd-Schaumstoffe 560
 Harnstoffharz UF 451
 Harnstoff 452
 Hart-Polyvinylchlorid PVC-U 295
 Hartsegment 522, 531
 Hart-Weich-Kombination 525
 Härter 441
 Härtezeit 117
 Härtung 441
 Harzblase 447
 Harze 441
 Harzformstoff 442
 Harzmasse 442
 Harzmatte 443
 Harzträger 442
 HAS 133
 Hauptsatz der Kunststofftechnik 104, 135
 Hauptvalenzbindungen 72 ff.
 Hausmüll 605
 HBHV-Copolymer 576–578
 H-Brücken 390
 Heizwerte 608
 – unterer 608
 Heizelementschweißen 238
 Heißabschlag 155

- Heißmischung 312
 Heißprägen 250
 Helix 90
 Herstellung von Chemiefasern 189
 heterophasische Copolymere 279
 Hexafluorpropylen 434
 Hexahydrophthalsäure 472
 Hexahydrophthalsäure-diglycidester 472
 Hexa-Hydroxymethylmelamin 456
 Hexamethyldiamin 383
 Hexamethylentetramin 449
 High-Density-Polyethylen PE-HD 266
 Hilfsstoffe 543
 HM-C-Faser 402
 Hochdruckanlage 207
 Hochdruckharze 442
 Hochdruckverfahren 261
 hochfeste Polymerfasern 22
 Hochleistungspolymere 481
 hochmolekulare Stoffe 40
 Homopolymerisate 55
 homöopolare Bindung 73
 Hookesches Gesetz 122
 HT-Faser 402
 Hybride Polymersysteme 566
 Hydrocellulose 573
 Hydrofluor-Kohlenwasserstoffe 535
 Hydrogele als Funktionspolymere 584
 Hydrolyse 372
 hydrolytischer Abbau 351
 Hydroperoxid 129
 2-Hydroxybenzophenon 134
 Hydroxylgruppe 63
 Hydroxymethylgruppe 448
 β -Hydroxyvaleriansäure, HV 576
 hygroskopisch 272
 hyperverzweigtes Makromolekül 43
- I**
- Imidgruppe 381, 494
 Imprägnieren 216
 in situ-Polymerisation 59, 388
 In-Mold Coating, IMC 250
 In-Mold Decoration, IMD 249
 In-Mold Labeling, IML 170, 249
 Induktionskräfte 78
 Induktionsschweißen 240
 Inertgas 69
 Inhibitor 50
 Initiatoraddition 50
 Initiator 47, 51 f.
 Initiierung/Startreaktion 47, 51
 innere Alterungsursachen 128
 innere Weichmachung 107, 372
 Insertion 262
 Integral-Schaumstoffe 107
- International Material Data System, IMDS 3
 interne Gleitmittel 302
 intrinsisch elektrisch leitfähige Polymere 555
 Ionenbindungen 79
 Ionomere 79
 irreversibel 514
 Isobuten-Isopren-Kautschuk 515
 Isobutylen 257
 Isocyanat 535
 isocyanatfreie Polyurethane (NIPU) 548
 Isophthalsäuredichlorid 492
 Isophthalsäure 353, 395, 462
 Isopren-Kautschuke IR 515
 isotaktisch 88
 isotaktisches Polypropylen PP-it 87 f.
- K**
- K-Wert 297
 Kalandrieren 186
 Kaltabschlag 155
 kalte Verbrennung 565
 Kaltformen 225
 Kalthärtung 464
 Kasein 14
 Katalysator 57
 Kation 51
 kationische Kettenpolymerisation 51
 Kautschuk 121
 Kautschuktyp 514
 Kehrlichtheizkraftwerk (KHK) 605
 Kerbschlagzähigkeit 416
 Keto-Enol-Tautomerie 134
 Kettenabbruch 49, 52 f.
 Kettenkopolymerisation 55
 Kettenlänge 95
 Kettenpolymerisation 45–46
 Kettenstabilisierung 415
 Kettenübertragung 48, 51 f.
 Kettenverzweigung 49, 85
 Kettenwachstumsreaktion 45, 70
 Kettenwachstum 48, 51 f.
 Kevlar-Faser 492
 Kicker 535
 Kleben 241 ff.
 Ko-Kneter 154
 Kofler-Heizbank 140
 Kohlenhydrate 29
 Kohlenstofffasern (C-Fasern) 402
 Kohlenwasserstoffe 38
 Kohäsion 241
 kombinierte Verfahren 227
 Kondensation 62
 Kondensationsenthalpie 608
 Kondensationscopolymerisation 63
 Kondensationsharze 442

Kondensationspolymerisation
(Polykondensation) 45, 62 f.
Kondensationspolymerisation unter
Ringschluss 498
Konditionieren 254
Konfiguration 44, 81, 87, 89
Konstitution 44, 81 f.
konstitutionelle Repetiereinheit 83
koordinative Kettenpolymerisation 54
koordinative Polyinsertion 54
Kopf-Kopf-Anordnung 86
Kopf-Schwanz-Anordnung 86
Kopf-Schwanz-Polymerisation 48
kovalente Bindungen 73
Kreislaufwirtschaft 591
Kristallinität 93
Kristallisationsgrad 93
Kristallitschmelztemperatur 119
Kristallkeimbildner 93
Kristalllamellen 92
Kunststoffabfälle 596
Kunststoffe 1, 37, 41, 104, 143
Kunststoff-Flaschen 316
Kunststoffverpackungen 593
Kupplungsschicht 201
Kurzkettenverzweigung 257
Kurzzeichen für Kunststoffe 12

L

Lackieren 248
Lactam 382, 386
Laminat 459, 461, 468
Laminierharze 443
Laminierverfahren 460
Länge eines Makromoleküls 42
Langkettenverzweigung 257
Laserbeschriften 250
latent 473
Latex 521
ω-Laurinlactam 383
lebende Polymere (living polymers) 53
Lebensdauer 128, 592
Leiterpolymere 44, 499
Leitfähigkeit 24
Leitfähigkeitszusätze 109, 554
Lichtemittierende Polymere 24, 561
Lichtinduzierte Alterung 130
Lichtschutzmittel 129, 521
Lichtstabilisatoren 296
lineare Polyolefine 22, 257
lineare Verarbeitungs- und Nachschwindung
94
Linters 371
Lösekerntechnik 181
Lösemittel 151
Lösungs-Additionspolymerisation 68
Lösungs-Kondensationspolymerisation 68

Lösungsverfahren 57, 263
low profile (LP) 463
low shrink (LS) 463
lyotrop 488

M

M-Kautschuke 514
m-Phenylendiamin 492
m-Xylylendiamin 395
Makrokonformation 89
Makromoleküle 16, 40 ff., 100
Maleinimid-Gruppe 497
Maleinsäure/cis-Butendisäure 462
MAP-Verpackungen 583
Maslowschen Bedürfnispyramide 8
Massenfließrate 95
Massenwirkungsgesetz, MWG 62
Massepolymerisation-Polyvinylchlorid
M-PVC 301
Masterbatch 108
Mastikation 71, 519
MC 460
mechanische Bindungen 72, 79
mechanische Treibverfahren 203
Mehrkomponenten-Spritzgießen 178
mehrschichtige Flasche 171
Melamin 456
Melamin-Phenol-Formaldehyd 455
Melamin-Polyester 455
Melaminharz MF 454
Melaminharze, modifizierte 455
Memory-Effekt 171
mesogen 488
mesomorph 488
meta-Kresol 447
Metallfolien 180
Metallisieren 250
Metalloen-Katalysatoren 55
Metalloen-katalysierte Ethylencopolymere
PE-MC 268
Metalloen-katalysiertes Polypropylen mPP
282
meta-Phenylendiamin 473
Methacryl-imid-Gruppe 497
Methacrylnitril 401
Methacrylsäuremethylester 365
Methacrylsäure 466
Methylamin 368
Methylcellulose 573
Methylchlorid 535
Methylenharnstoff-Gruppe 457
Methylenmelamin-Gruppe 457
Methylenphenol-Gruppe 450
Methylethylketonperoxid 464
Methyl-Fluor-Siloxan-Kautschuk MFQ 515
Methylmethacrylat 365

- Methacrylat-Acrylnitril-Butadien-
 Styrol MABS 367
 Methacrylat-Polymerisate,
 modifizierte 366
 4-Methylpenten-1 289
 α -Methylstyrol 325
 MFR-Wert 95
 Micellen 59
 migrieren 311
 mikrobielle Ökologie 27
 mikrobieller Angriff 308
 Mikrofasern 93
 Mikroplastik 613
 Mikropräzisions-Spritzgießen 413
 Mikro-Suspensionspolymerisation 299
 Milchsäure 535
 Milieu-Harz 463
 Mischen 152
 mittlere Molmasse 50, 95 f.
 mittlerer Polymerisationsgrad 98
 Modifizierung
 – physikalische 101
 – von teilaromatischen Polyamiden 398
 Modifizierung 100
 Molding Compounds 184, 460
 Molekulare Nanotechnologie 569
 Molekulargewicht 40
 Moleküle 38, 40
 Molmassenregler 359
 Molmassenverteilung 41, 95 f.
 Molmasse 40, 85, 96
 Mono-Hydroxymethylharnstoff 453
 Monomer casting 388
 Monomer 45
 Morphologie 93
 MuCell-Verfahren 180
 Mulchware 260
 Multiblockcopolymer 530
 Multifunktionalität, smart Polymers 566
 multimodale Molmassenverteilung 266
 MVR-Wert 96
- N**
- Nachfolgevorrichtung 164
 Nachhaltigkeit 590
 Nachschwindung 94
 Nachstabilisierung 601
 Nanocomposites 568
 Nanofasern 193
 Nanoröhren CNT 567
 Nanotechnologie 569
 Nassspinnen 192
 Natriumhydrogencarbonat 534
 Natriumsulfid 508
 Naturkautschuk NR 31, 515, 519, 521
 Nebervalenzbindungen 72, 75, 390
 Nebervalenzkräfte 75, 118
 Newtonsches Fließgesetz 111
 Niederdruckanlage 207
 Niederdruckharze 442
 Niederdruckverfahren 262
 Nitril-Kautschuk 515
 Nitrilgruppe 381, 400
 Nomex-Faser 492
 Norbornen 271
 Norrish-Reaktionen 130
 Novolake 444, 447 f.
 Nukleierungsmittel 93, 109, 350
 Nylon 18, 399
 Nylon-Rope-Trick 69
- O**
- O-Kautschuke 514
 Oberflächenharze 463
 Oberflächenspannung/Oberflächenenergie
 242
 Oberflächenvorbehandlung 249
 Octabins 146
 offenzellig 201
 OLEDs 561
 Olefine 257, 290
 α -Olefin 267
 One-shot-Verfahren 543
 On-line-Lackierbarkeit 420
 opak 258
 optische Aufheller 108 f.
 organische Chemie 38
 Organisole 247
 Orientierung 102, 171
 oxidative Kupplung 420
- P**
- p-Dichlorbenzol 508
 p-Methylstyrol 325
 p-Phenylendiamin 492
 p.h.r. 310
 Paraffine 265
 Partikel-Schaumstoffe 536
 Pasten-Extrusion 426
 Pastenverarbeitung 309
 Pathogenese 146
 Pathologie eines Werkstoffs 146
 pathologische Technologie 146–147, 149
 pathologischer Befund bei den
 Aufbereitungsverfahren 156
 pathologischer Befund beim Schweißen
 240
 pathologischer Befund beim Urformen 222
 pathologischer Befund beim Umformen
 231
 PC+ASA-Blends 361
 PC+LCP-Blends 361
 PC+PBT-Blends 361

- PE-HD (PE hoher Dichte) 257
PE-LD (PE niedriger Dichte) 257, 266
PE-LLD/PE-VLD (lineares PE niedriger/sehr niedriger Dichte) 266
PE-MD (PE mittlerer Dichte) 257
Pentan 535
Perfluoralkoxy-Copolymer PFA 432
Perfluorpropylvinylether 434
Perkolationsgrenze 555
Permeation 126–127
Peroxid 47
Petrochemie 5
PE-UHMW 266
Pfcopolymere 56 f., 530
Phasengrenzflächen-Verfahren 359
Phasenvermittler 102
Phenol-Formaldehyd-Harze 15, 443
Phenol-Formaldehyd-Schaumstoffe 550
Phenol 447
Phenoplaste (Phenol-Formaldehyd-Kondensationsharze) PF 443 f.
Phosgen 357
photoadressierbare Polymere 561
Photolacke 564
Photolithographie 564
Photoresists 564
Photosynthese 27, 29
Phthalsäure 462
physikalisch abbindende Klebstoffe 243
physiologischen Unbedenklichkeit 297
PICVD-Technologie 252
Piezo- und Pyroelektrizität 558
piezoelektrische Polymere 558
Pilze 604
PIR 548
Planetenwalzenextruder 163
Plasmabeschichten 252
plasmainduzierte Polymerisation 62
Plasmapolymerisation 62
plastics 1
Plastikmüll im Meer 599
plastischer Zustand 1
Plastisole 247
PMDI 547
PMMA+ABS-Blends 368
PO-Schaumstoffe 538
Polarität 74, 77, 126
Polieren 234
Poly-4-methylpenten-1 (PMP) 288–289
Polyacetale 412
Polyacetylen PAC 555
Polyacrylester 366
Polyacrylnitril PAN 400 f.
Polyaddition 45
Polyaddukte 67
Polyalkylenterephthalate 348
– modifizierte 353
Polyamid PA 63, 381
Polyamid-imid 496, 500
Polyanilin PANI 556
Polyarylamid PARA 398, 497
Polyarylate PAR 347, 485, 487
Polyaryletherketone PAEK 482
Polyarylsulfone PSU, PES, PPSU 503
Polybenzimidazol 495, 499
Polybismaleinimid 495, 501
Polybutadien 330, 519
Polybuten-1 (PB-1) 287
Polybutylen-Adipat-Terephthalat PBAT 580
Polybutylenoxid 531
Polybutylensuccinat PBS 347
Polybutylenterephthalat PBT 349 ff.
Polycaprolacton PCL 582
Polycarbonat PC 21, 356 ff.
Polycarbonat-Cokondensate 360
Polycarbonate, modifizierte 359
Polycarbonat-Siloxan-Blockcopolymer
361
Polychlorotrifluorethylen PCTFE 433, 436
Polydiallylphthalatharz PDAP, PDAIP 476
Polyelektrolytmembran PEM 566
Polyestercarbonat PEC 362, 486
Polyesterimid 496, 501
Polyester-Polyole 546
Polyesterurethan-Kautschuke 516, 523
Polyester 20, 347 ff.
Polyetheramid-Block-Copolymere 523,
532
Poly-Ether-Block-Amide PEBA 532
Polyetheretherketon PEEK 483 ff.
Polyetherimid 496, 501
Polyetherketon PEK 483 f.
Polyetherketonetherketonketon 484
Polyether-Polyole 545
Polyethersulfon PES 503, 505
Polyetherurethan-Kautschuk 516
Polyethylen PE 17, 46, 257 ff.
Polyethylendioxythiophen PEDOT 563
Polyethylennaphthalat PEN 354
Polyethylenterephthalat PET 350 ff.
Polyformaldehyd 411
Polyharnstoff 535, 545
Polyhydroxyalkanoate PHA 575
Polyhydroxybutyrat PHB 29
Polyimid PI 494 ff.
Polyimidazole 495
Polyisobutylen (PIB) 285, 525
Polyisocyanat 543 ff.
Polyisocyanurat PIR 548
Polyisopren 519
Polyketon PK 276
Polykondensate 63
Polykondensation 45
Polylactid PLA 10
Polymer 41 f.
Polymerblends (Polyblends) 101, 354, 361

- Polymerdruckverfahren 219
 Polymere Leuchtdioden PLEDs 561
 Polymere Photovoltaik PPV 562
 polymeres Gel 222
 Polymergemische 101
 Polymerisate 46
 Polymerisation 45
 – in Emulsion 57, 59
 – in Lösung 57 f.
 – in Masse 58
 – in Substanz 57 f.
 – in Suspension (Perlpolymerisation) 57, 61
 – unter Fällung 57 f.
 Polymerisationsgrad n 46, 70, 98
 – mittlerer \bar{P} 98
 Polymer-LED 561
 Polymerlegierung 101–102
 Polymermatrix 106, 330
 Polymermolekül 41
 Polymer-Rohstoff 104
 Polymethacrylimid-Schaumstoffe 550
 Polymethacrylmethylimid PMMI 368, 502
 Polymethylmethacrylat PMMA 364
 Polymilchsäure 10
 Polymorphismus 278
 Poly-m-phenylenisophthalamid PMPI 492
 Polyol 543, 545
 Polyol-Prepolymer 543
 Polyolefine 257 ff.
 Polyolefin-Schaumstoffe 538
 Polyoxymethylen POM 21, 412 ff.
 Polyoxymethylen, modifizierte 416
 Polyparaphenylenvinyle, PPV 556
 Polyparaphenylene 556
 Polyphenylchinolin 556
 Polyphenylenether PPE 418
 Polyphenylenemethylen PPM 29
 Polyphenylsulfid PPS 506, 556
 Polyphenylsulfon PPSU 503, 505
 Polyphthalamid, PPA 397
 Poly-p-phenylterephthalamid PPTA 492
 Polypropylen PP 277 ff.
 Polypropylenglykol 546
 Polypropylenoxid 411, 547
 Polypyrrol PPY 556
 Polyreaktionen 45
 Polysaccharide PSAC 371, 572
 Polysiloxane 475
 Polystyrol, Integralschaumstoffe 206
 Polystyrol PS 18, 320 ff.
 Polystyrol-Schaumstoffe PS-E 204, 536 ff.
 – Hartschaumstoffe 536 f.
 – Integralschaumstoffe 537
 – Strukturschaumstoffe 538
 Polystyrolsulfonat PSS 563
 Polysulfid-Kautschuk 516
 Polysulfon PSU 503 f.
 Polysulfone, modifizierte 506
 Polytetrafluorethylen PTFE 75, 425 f.
 Polytetrafluoräthylen-Copolymer 429
 Polytetramethylterephthalat 352
 Polythiophen PT 556
 Polytrimethylterephthalat (PTT) 353
 Polyurethan-Schaumstoffe 206, 539 ff.
 Polyurethan 19, 67 f., 381, 545
 Polyvinylacetat (PVAC) 581
 Polyvinylalkohol PVAL (PVOH) 581
 Polyvinylchlorid PVC 16, 295 ff.
 Polyvinylchlorid-Schaumstoffe 550
 Polyvinylfluorid PVF 433, 435
 Polyvinylidenchlorid PVDC 316
 Polyvinylidenfluorid PVDF 433, 435, 558
 POM-Copolymerisate 415
 POM-Homopolymerisat POM-H 414
 Porenstruktur 201
 Powder Injection Molding PIM 182
 PPE+PA-Blends 420
 PPE+PS-Blends 420
 Prepolymerverfahren 543
 Prepolymer 363, 498
 Prepregs 443
 Pregregverarbeitung 197
 Pressen 183
 Pressen von Thermoplasten 185
 Primäracetat 371
 Primärstruktur 81
 1,2,3-Propantriol (Glycerin) 547
 Propylen 257
 Protein-Struktur 15
 Proton 38
 PS + PE Blends 340
 PS-I 329
 PS-I + PPE Blends 339
 Pultrusion 199, 460
 Pulverbeschichten 247
 Pulverlacke 468
 PUR-Gießharze 476
 PUR-Schaumstoffe, 539 ff.
 – Halbhart-(semiflexible) Schaumstoffe 541
 – Hartschaumstoffe 540 f.
 – Integral-Halbhartschaumstoffe 542
 – Integral-Hartschaumstoff PUR-I 541
 – Weichschaumstoffe PUR-W 540
 PVC Hart-Folie 188
 PVC-Pasten 313
 Pyridin-Verfahren 358
 pyroelektrische Polymere 559
 Pyrolyse 447
 Pyromellithsäuredianhydrid 497
- Q**
 Q-Kautschuk 514
 Quaterpolymer 56

Quinterpolymer 56

R

R-Kautschuke 514

Radikal 47

radikalische Kettenpolymerisation 47

Radom 469

Rakel 246

Ram-Extrusion 426

Random-Copolymere 56 f.

Rapid Manufacturing 217

Rapid Prototyping (RP) 216–217

Rapid Tooling 217

Raschelware 260

Rauchgasdichte 483

Raumgewicht 107, 202, 533

Reaction Injection Molding 209

reactive processing 527

Reaktionsharz-Duroplaste 458 f.

Reaktionsharze 442, 463

Reaktionsharzformstoff 442

Reaktionsharzmasse 463

Reaktionsmittel 441

Reaktionsschaumgießen 206, 535

Reaktionsspinnen 193

Reaktionsspritzgießen 535

Reaktionsverlauf 64

Reaktor 57

Recken 104, 365

Recyclierbarkeit 595

Recycling 595

recyclinggerechte Konstruktion 615

recyclingorientierte Produktentwicklung
615

Redoxreaktionen 565

Regler 49

Reibungsschweißen 239

Reinforced-Reaction-Injection-Molding
544

Rekombination 49

relative Molekülmasse 40 f.

Relaxation 123

Resitol 449

Resit 449

Resole 444 ff.

Rheologie 111

RIM-Technik 544

RIM-Verfahren 209, 535

Ringmolekül 44

Ringspaltung 46

Rohdichte 107

Rohrextrusionsanlage 165

Rohrreaktor 261

rohstoffliches Recycling 602

Rotationsformen 215

Rotationsgießen 215

Rovings 459

RRIM 210, 544

RSG-Verfahren 199, 206, 535

Rückprallelastizität 518

Rührautoklave 261

Rumpfladung 74

S

Sägen 234

Sandwich-Bauelement 208

Schadenverhütung/Schadensanalyse 135

Schaum 107, 201

Schaumbildung 203

Schaumstabilisator 544

Schaumstoffe 533 ff.

Schaumstoffplatten 208

Schergeschwindigkeit 111, 115

Schichtpressen 183, 185

Schichtpressstoff 446, 455

Schießbaumwolle 372

schlagzäh modifiziertes Polystyrol PS-I 329

schlagzähe Acrylnitril-Styrol-Formmassen
ASA, AES, ACS 337

schlagzähes PMMA-HI 367

schlagzähes PP SHIPP 284

Schlagzähigkeit 100, 107, 305, 329, 416

Schleifen 235

Schleuderverfahren (Schleudergießen) 215

Schmelz-Additionspolymerisation 68

Schmelzefließrate 95

Schmelzekerntechnik 181

Schmelzindex 95

Schmelz-Kondensationspolymerisation 68

Schmelzkondensation 69, 358

Schmelzspinnen 190

Schmelztemperaturbereich 119

Schmiermittel 110

Schnecken-spritzgießmaschine 173

Schnecke 162

Schrumpfung 355

Schrumpfung (Memory-Effekt) 104

Schub-/Scherspannung 111

Schubmodul 118

Schwanz-Schwanz-Anordnung 86

Schwefelvulkanisation 508

Schweißen 235

schwerentflammbar 296

Schwindung 93

Schäumen 201

Sebacinsäure 383, 578

Seitenketten-LCP 560

Sekundärcetat 372

Sekundärbindungen 75

Sekundärstruktur 89

Selbstorganisation 221

Selbstpoliereffekt 369

selbstverlöschend 296, 488

Selective Laser Sintering (SLS) 220

- Selektives Lasersintern 220
 Shore-Härtebereich 524
 Si-Wafer 564
 Sicherheitsaspekte 587
 Silanvernetzung 259
 Silicone 19, 475
 Siliconharze 475
 Siliconöl 544
 siliertes Polyethylen 269
 Skinpack-Verfahren 230
 Slicen 217
 SMC 184, 460
 SMS 324
 Solarzellen 562
 Sonderverfahren 178, 235
 Sonderwerkstoffe 553
 Spacer 488, 493
 Spannungs-Dehnungs-Diagramm 124
 Spannungsrissbeständigkeit 258
 Spannungsrissbildung 126
 spezifisches Volumen 94
 Sphärolith 92
 Spinnprozess 190
 Spinnverfahren 188
 Spritzblasformen 172
 Spritzgießen 173 ff.
 – von vernetzenden Polymeren 182
 Spritzgießen 173
 Spritzgießmaschine 175
 Spritzgießwerkzeug 175, 176
 Spritzpressen 183 f.
 Spritzprägen 181
 Spritz-Streckblasformen 172
 Stabilisatoren 108, 129, 301
 statistische Copolymere 56
 statistisches Terpolymer 276
 Stereo-Kautschuk 519
 Stereolithografie (SL) 218
 stereospezifischer Katalysator 13
 Stereospezifität 54
 sterische Konfiguration 87
 Sternmolekül 43
 STL-Format 217
 Stoffumwandlung 572, 580
 Stoßelastizität 518
 Strahlenvernetzung 254
 Strahlungsschweißen 238
 Strangaufweitung 112
 Strecken 104
 Streichen und Gelieren von PVC-Weich-
 Pasten 246
 Streichverfahren 245
 Struktur von Gummi 16
 Strukturmerkmale 80
 Struktur-Schaumstoffe (Integral-) 107
 strukturviskos 111
 Stufenwachstumsreaktion 45, 63, 70
 Styrofoam-Verfahren 205
 Styrol mit α - bzw. p-Methylstyrol 324
 Styrol-Acrylnitril SAN 327 f.
 Styrol-Butadien SB 329
 Styrol-Butadien-Blockcopolymer SBS 333
 Styrol-Butadien-Kautschuk 515
 Styrolpolymere 321 ff.
 – modifizierte 326
 Styrolpolymere 321
 Styrol 57, 323
 Styropor-Verfahren 204, 536
 Stärkeblends 574
 Stärkewerkstoffe 573
 Substanzmischung 41
 Substanz 41
 Suspendierhilfsmittel 61
 Suspensions-Polyvinylchlorid S-PVC 299
 Suspension 61
 Sustainable Development Goal (SDG) 591
 Switchboard-Modell 91
 syndiotaktisches Polystyrol PS-s 326
 syndiotaktisch 88
 Synergismus 133
 Syngas 27
 Synthesekautschuk/Gummi 17, 31, 514 ff.
 Systemgrenze 609
- T**
- Tafel-/Extrusionsanlage 165
 Tampondruck 249
 Tauchformen 216
 TDI 545
 Technoklima 125, 128
 Technologie 143
 Teflon 19
 teilaromatische Polyamide 394
 teilkristallin 41, 91, 118, 397
 (teil)kristallin 44
 teilkristalline aliphatische Polyamide 381
 – modifizierte 391
 teilkristallines Polyethylenterephthalat
 PET-C 350
 Temperaturleitfähigkeit 196
 Tempern 253
 Terephthalsäuredichlorid 492
 Terephthalsäure 348, 395, 462
 Terpolymere 56, 276
 Terpolymerisate 416
 Tertiärstruktur 90
 Tetrabrombisphenol A 471
 Tetrachlorbisphenol A 471
 Tetraedermodell 87
 Tetrafluorethylen-Hexafluorpropylen-
 Copolymer FEP 432
 Tetrafluorethylen-Hexafluorpropylen-
 Vinylidenfluorid-Terpolymer THV 433
 Tetrafluorethylen 428
 Tetrahydrophthalsäure 462

- 2,2,4,4-Tetramethyl-1,3-cyclobutandiol
 CBDO 354
 Tetramethyldiamin 383
 Textile Flächengebilde 196
 Texturieren 195
 thermisch-mechanisches Verhalten 117
 Thermoanalyse TA 136
 Thermoelaste 120, 366, 425
 Thermofixieren 194
 Thermoformen 225
 Thermoformmaschine 230
 Thermografie 560
 Thermogravimetrische Analyse TGA 136
 Thermomechanische Analyse TMA 136
 Thermooptische Analyse TOA 136
 thermooxidative Alterung 129
 thermooxidativer Abbau 71
 Thermoplaste 41, 117 f., 156
 thermoplastisch verarbeitbare Fluor-
 Kunststoffe 430, 432, 436
 thermoplastische Elastomere auf Olefinbasis,
 TPE-O/TPE-V TPO/TPV 527
 thermoplastische Elastomere auf Styrolbasis,
 TPE-S TPS 527
 thermoplastische Elastomere TPE 41,
 120 f., 514, 521 ff.
 thermoplastische Polyamid-Elastomere,
 TPE-A TPA 528
 thermoplastische Polyester-Elastomere,
 TPE-E TPC 528
 thermoplastische Polyurethan-Elastomere,
 TPE-U TPU 529
 Thermoplast-Schaum-Blasformen 535
 Thermoplast-Schaum-Extrusion 535
 Thermoplast-Schaum-Spritzgießen 535
 thermotrop 488
 Thiole 49
 tie-Moleküle 92
 Tissue Engineering 570
 T-Kautschuke 514
 Topologie 42
 Tränken 216
 transluzent 258
 transparent 258
 Traubenzucker 371
 Treibmittel 107, 533, 543
 – chemische 533
 – mechanische 533
 – physikalische 533
 Treibverfahren, physikalische 203
 Trennen (Spanen) 145, 233 ff.
 Trennmittel 110
 2,4,6-Triamino-1,3,5-triazin 456
 Triazinharze 478
 Triblockcopolymerer 56
 Triboelektrizität 559
 Tri-Hydroxymethylmelamin 456
 Trimellithsäureanhydrid 500
 1,1,1-Tris (4-hydroxyphenyl)-ethan THPE
 360
 Trioxan 414
 Trockenmischungen 312
 Trockenspinnen 192
 Trommsdorff-Effekt 50, 366
 TSE-Verfahren 180, 535 f.
 TSG-Verfahren 180 f., 206
 Typen von Makromolekülen 43

U
 U-Kautschuke 514
 ultrahochfeste Fasern 24
 Umesterung 349, 358
 Umformen 145, 225
 Umwandlung von Naturstoffen 71
 Umwelteinflüsse 125
 Umweltschutz 595, 612
 ungesättigte Polyesterharze UP 57, 458
 UP-Reaktionsharzmasse 460
 Urethangruppe 67, 381, 545
 Urformen 145, 159
 UV-Absorber 108, 296
 UV-Stabilisatoren 108, 460

V
 Vakuumgießen 213
 van der Waals-Bindungen 76
 van der Waalssche Kräfte 76
 Vanadiumbasis 282
 VDA 260 3
 Verarbeitungsadditive 104
 Verarbeitungsschwindigkeit 94
 Verarbeitung 143
 Verbundwerkstoffe 106
 Veredeln 145, 247
 Veresterung 83
 Verfahrenstechnik beim Kalandrieren 187
 Verfahrenstechnik der Kettenpolymerisation
 57
 Vergrößerung des Polymerisationsgrads
 70
 vernetztes Polyethylen PE-X 254
 Vernetzung 64 ff., 101, 117, 436, 441, 519,
 520
 – physikalische 45, 513
 Vernetzungsgrad 85
 Vernetzungsmittel 465, 520
 Verringerung des Polymerisationsgrads 71
 Verseifung 83
 Verstrecken 104, 194
 Verstärkungsmittel 521
 Verstärkungstoffe 106, 151
 Verteiler 521
 Verweilzeit 116
 Verwertung 594

- Verzug 93
 Verzweiger-Monomere 359
 Verzweigungsgrad 85, 265
 Vinylchlorid 299
 Vinylchlorid-Copolymerisate 303
 Vinylchlorid/Ethylen/Vinylacetat VCEVAC 306
 Vinylchlorid/N-Cyclohexylmaleinimid 304
 Vinylchlorid-Polymerisate, modifizierte 302 ff.
 Vinyl-Elastomere 525
 Vinylesterharz VE 465
 Vinylfluorid 436
 Vinylidenchlorid VDC 317
 Vinylidenchlorid-Copolymerisate 317
 Vinylidenfluorid 435
 Vinylmonomer 47
 viskos-elastisch 112
 Viskose 15
 Viskositätsfunktion 113
 Viskositätskurve 113
 Viskositätsskala 113
 Viskosität 95, 111, 113, 114
 Volatile Organic Compounds (VOCs) 417
 Volumenschwindung 94
 Volumen-/Töpfchen-Modell 94
 Vorbehandlungsverfahren 249
 Vorkondensat 453
 Vorstabilisierung 301
 Vortrocknen 156
 Vulkanisation 14, 121, 514, 518
- W**
- Wärmestabilisatoren 109, 301
 Warmformen 225
 Warmgasschweißen 238
 Warmhärtung 464
 Wasseraufnahme 126
 Wasserstoffbrückenbindungen 78, 390
- Weichmacher 107, 151, 308 ff., 372, 391, 420, 521
 Weich-Polyvinylchlorid PVC-P 307, 525
 Weichschaumstoffe 542
 Weichsegment 522, 531
 weitmaschige Vernetzung 44
 Weißbruch 296
 Wendelstruktur (Helix) 90, 429
 Werkstoffdatenbanken 4
 werkstoffliches Recycling 599
 Werkstoffklassen 1
 Wiederholungseinheit 81
 Wieder- oder Weiterverwertung 596
 Wirbelmischer 154, 313
 Wirbelsintern 247
 Wirkungsgrad η 608
 Wood Plastics Composites WPC 571
- X**
- 3,5-Xylenol 447
 1,3-Xylylendiamin 398
- Z**
- Zahlenmittel 97
 Zellglas 373
 Zellstoff 371
 Zellstruktur 201, 533
 Zementindustrie 611
 Zerkleinern 155
 Zersetzungstemperatur 73, 121
 Ziegler-Natta-Katalysatoren 54, 263
 Zirkonocene 282
 z-Mittel 98
 Zucker 371
 Zugdruckumformen 227
 Zugspannung 122
 Zugumformen 227
 Zusatzstoffe 40, 104 f., 151
 zwischenmolekulare Kräfte 75