

Durchlässigkeit

Die meisten Kunststoffe haben eine relativ hohe selektive Durchlässigkeit für Gase. Das erlaubt zum Beispiel den Einsatz als Membranen zur Gastrennung, schränkt ihre Eignung aber für Lebensmittelverpackungen ein. Speziellere Kunststofftypen wiederum besitzen gute Gasbarriere-Eigenschaften, haben aber oftmals einen hohen Preis und für Verpackungen ungünstige mechanische Eigenschaften. Solche Kunststoffe mit geringer Durchlässigkeit nutzt man als Barrierefächer im Inneren von mehrschichtig aufgebauten Folien (Verbundfolien), die im Coextrusionsverfahren hergestellt werden.

Selektive Durchlässigkeit wird in einer speziellen Weise auch in bestimmten Brennstoffzellentypen genutzt, bei denen durch semipermeable Polymermembranen hindurch Protonen transportiert werden.

Beständigkeit

Hohe Chemikalienbeständigkeit ist eine herausragende Eigenschaft von Kunststoffen. Neben der traditionellen Verwendung für Kunststoff-Rohrleitungssysteme in der chemischen Industrie werden sie auch für die Auskleidung von metallischen Rohren und Behältern eingesetzt. Spezielle Anwendungen von Thermoplasten finden sich bei Rohrleitungssystemen für die Halbleiterherstellung (starke Säuren oder hochreines Wasser) und in der Biotechnologie.

Ein traditionelles umfangreiches Einsatzgebiet sind erdverlegte Wasser- und Gasrohrleitungen. Dabei kommt die generelle hohe Korrosionsbeständigkeit von Kunststoffen ebenso zum Tragen wie die Fähigkeit eines Kunststoffrohrs, gewisse Deformationen durch Verschiebungen im Erdreich über sehr lange Zeiten ohne Bruch zu ertragen.

Die gute Beständigkeit hat aber auch zur Folge, dass Kunststoffe im Vergleich zu natürlichen Werkstoffen wie Holz oder Baumwolle teilweise nur sehr langsam abgebaut werden. Das bedeutet, dass Kunststoffprodukte bei nicht fachgerechter Entsorgung gegen den Einfluss von Umweltbedingungen über mehrere 100 Jahre bestehen können. Weltweit wird daher eine Anreicherung von Kunststoffmüll an Stränden, in Meerestruedeln und Sedimenten beobachtet. Mit dieser Ansammlung von Kunststoffmüll geht eine massive Umweltschädigung einher, und deswegen muss besonders bei kurzlebigen Produkten, wie zum Beispiel Verpackungen, ein verantwortungsvoller Umgang mit den Kunststoffen durchgesetzt werden (siehe Abschnitt 1.5).

Schon seit langem gehen Entwicklungen auch in Richtung biologisch abbaubarer Kunststoffe, die sich durch Umwelteinflüsse zersetzen und deren Verweildauer in der Natur dadurch deutlich reduziert wird (Kapitel 13). Dabei besteht eine Herausforderung darin, den Werkstoff so einzustellen, dass er während des Gebrauchs seinen Zweck (z.B. als Verpackung oder Medizinprodukt) in vollem Umfang erfüllt, nach der Nutzung aber möglichst schnell in unbedenkliche Stoffe zerfällt.

Temperaturstabilität

Dem Vorteil der vergleichsweise niedrigen Formgebungstemperaturen steht die im Vergleich zu den Metallen geringe Temperaturbeständigkeit von Kunststoffprodukten gegenüber. Für die Einsatztemperaturen von technischen Thermoplasten kann als Obergrenze zur ersten groben Orientierung der Bereich von 70 ° bis 150 °C angegeben werden, für die generell teureren hochtemperaturbeständigen Thermoplaste liegt der Bereich bei 150 ° bis 250 °C. Duroplaste sind nicht schmelzbar und deshalb in der Regel bis zu höheren Temperaturen einsetzbar.

Wirtschaftlichkeit

Viele Kunststoffprodukte sind äußerst wirtschaftlich in großen Mengen herstellbar. Bei Formteilen zeigt sich die besondere Stärke des Spritzgießverfahrens, mit dem auch geometrisch sehr komplexe Formteile mit hohen Genauigkeitsanforderungen in einem einzigen Arbeitsgang in kurzen Zykluszeiten vollautomatisch gefertigt werden können. Die im Vergleich zu anderen Werkstoffen relativ niedrigen Schmelztemperaturen sind einer der Einflussfaktoren für diese hohe Wirtschaftlichkeit. Der im Vergleich zu anderen Werkstoffen niedrige Energieverbrauch bei der Verarbeitung dient sowohl dem wirtschaftlichen Ziel der niedrigen Energiekosten als auch dem ökologischen Ziel der Reduktion des Verbrauchs an Primärenergieträgern und der Reduktion der klimaschädlichen Emissionen.

Die preisgünstige Herstellung und einfache Verfügbarkeit von Kunststoffprodukten – u.a. im Bereich der Verpackungen – haben in den letzten Jahrzehnten bis heute in einigen Bereichen zu einem unreflektierten Umgang mit den Endprodukten geführt. Die umweltgerechte Handhabung von Abfällen ist längst zu einer großen Herausforderung geworden. Dieser Herausforderung müssen sich sowohl die Nutzer der Produkte als auch Industrie und Forschung stellen, indem sie nachhaltige, praktikable und überzeugende Lösungen für die Reduzierung und Verwertung der Abfälle entwickeln (siehe Abschnitt 1.5).

Rezyklierbarkeit

Kunststoffe sind in vielen Fällen wiederverwertbar. Es bestehen verschiedene Möglichkeiten, Endprodukte nach ihrem Gebrauch so aufzubereiten, dass eine mehrfache gleich- oder ähnlichwertige Verwendung technisch möglich ist. Die Steigerung des Anteils an wiederverwertendem Material wird nicht nur durch technische, sondern auch durch nichttechnische Hemmnisse erschwert. Im Abschnitt 1.5 wird hierauf näher eingegangen.

Abschließend ist zu sagen, dass Kunststoffe neben vielen Vorteilen auch einige Defizite mit sich bringen. Die Aufgabe des Kunststoffingenieurs besteht dabei darin, durch Werkstoffwahl und Konstruktion in der Gesamtbewertung das bestmögliche Ergebnis zu erzielen.

■ 1.3 Einsatzgebiete von Kunststoffen

Bild 1.3 gibt einen Überblick über die mengenmäßige Verteilung von Kunststoffen in Deutschland. Mehr als die Hälfte der Kunststoffe wird im Verpackungs- oder Baubereich eingesetzt, es folgen die Branchen Fahrzeugbau, Elektro und Elektronik, die Landwirtschaft und weitere Bereiche. Im Verpackungsbereich dominieren Polyethylen (PE) und Polypropylen (PP) sowie Polyethylenterephthalat (PET). Im Baubereich kommt neben PE und PP vorwiegend auch Polyvinylchlorid (PVC) zum Einsatz. Die Polyolefine PE und PP haben insgesamt den größten Mengenanteil.

Einige Anwendungsbeispiele mit typischen Merkmalen liefert die folgende Aufzählung:

- Verpackung: Folien, Beutel, Flaschen und andere Behälter ermöglichen es, Waren wirtschaftlich und ökologisch günstig zu verpacken. Der Erhalt von Lebensmitteln während des Transports und der Lagerung hat gerade in den warmen Erdregionen eine große Bedeutung.
- Bauwesen: Für Rohrleitungen, Bodenbeläge oder Fensterrahmen, sowie für die Wärmedämmung von Wänden, Böden und Dächern sind Kunststoffe unverzichtbar.
- Automobil: Der Innenraum im modernen PKW besteht nahezu vollständig aus Kunststoffen. Sie bieten viele Gestaltungsmöglichkeiten und damit eine große Designfreiheit für die Innen- und Außenausstattung der Fahrzeuge. Zahllose technische Teile, auch solche unter der Motorhaube, werden aus Thermoplasten gefertigt; manche davon sind mit Kurzglasfasern verstärkt. Hochleistungskunststoffe z. B. mit Carbonfaserverstärkung im Leichtbau ermöglichen emissionsärmere Mobilität und leisten damit einen Beitrag zur Nachhaltigkeit. Mit der Elektromobilität wird diese Bedeutung noch weiter zunehmen. Reifen, Schwingungsdämpfer und Dichtungen wären ohne Elastomere gar nicht denkbar.
- Energietechnik, Elektrotechnik, Elektronik, Computertechnik: Strom aus erneuerbaren Quellen wie Windenergie muss in Zukunft mehr und mehr über große Distanzen in Energiekabeln transportiert werden. Für die Gewinnung von elektrischer Energie aus Sonnenlicht sind organische Photovoltaikzellen eine moderne spezielle Anwendung von Polymerwerkstoffen. Für das Internet der Dinge werden zukünftig zahllose RFID-Mikrochips gebraucht, bei denen Chip und Antenne in Kunststoff eingebettet sind.
- Erneuerbare Energien: Beispiele sind organische Solarzellen in der Photovoltaik, Wärmetauscher und Leitungen in der Geothermie und Rotorblätter in Windkraftanlagen, deren Rotoren heute Durchmesser bis 120 Meter aufweisen und die nur mit Faser-Kunststoffverbund-Werkstoffen realisierbar sind.

- Medizin und Pharmazie: Die heutige Medizintechnik ist ohne Kunststoffe nicht vorstellbar. 45 Prozent aller weltweit hergestellten medizintechnischen Produkte bestehen aus Kunststoffen. Einige Beispiele sind:
 - Fäden für chirurgische Nähte sind im Körper abbaubar und werden resorbiert. In künstlichen Gelenken werden Kunststoffe in Kombination mit Keramik und Metall eingesetzt. Schrauben für die Chirurgie sind je nach Anwendung langlebig und verbleiben im Körper, oder sie müssen kurzlebig sein und im Körper abgebaut und resorbiert werden. Platten für die Unfallchirurgie aus dem Thermoplasten PEEK enthalten Füllstoffe, die sie im Röntgenbild sichtbar machen.
 - Bei Injektionsfläschchen und Fertigspritzen ist das Medikament oft sowohl mit Glas als auch mit Kunststoff und Gummi in direktem Kontakt, auch über lange Lagerzeiten. Bei diesen sog. Primärpackmitteln müssen aus Gründen der Sicherheit alle im konkreten Fall eingesetzten Typen dieser Werkstoffe für das jeweilige Medikament behördlich zugelassen werden.

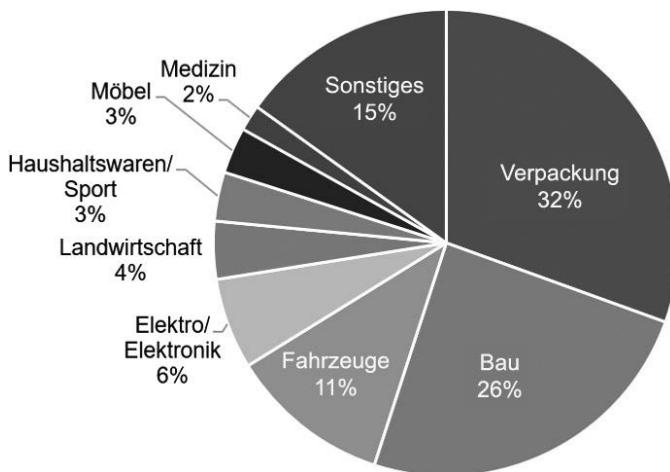


Bild 1.3 Einsatzgebiete von Kunststoffen in Deutschland 2017 [nach PlasticsEurope, Conversio]

■ 1.4 Die Kunststoffindustrie

Seit dem Beginn der massenhaften Produktion von Kunststoff in den 1950er-Jahren wächst die Kunststoffproduktion weltweit stetig an (Bild 1.4). Zwischen den Ländern bzw. Weltregionen gibt es jedoch große Unterschiede beim Wachstum: Während die bereits große Kunststoffindustrie in Deutschland nur noch leicht wächst bzw. in einzelnen Sparten stagniert, wächst sie in Ländern wie China, aber

auch in Osteuropa deutlich stärker. Dabei werden in vielen Ländern die Produktionskapazitäten erweitert, da die weltweite Nachfrage nach Kunststoffen steigt. 1989 überstieg das weltweit produzierte Kunststoffvolumen erstmals die Produktionsmenge von Stahl.

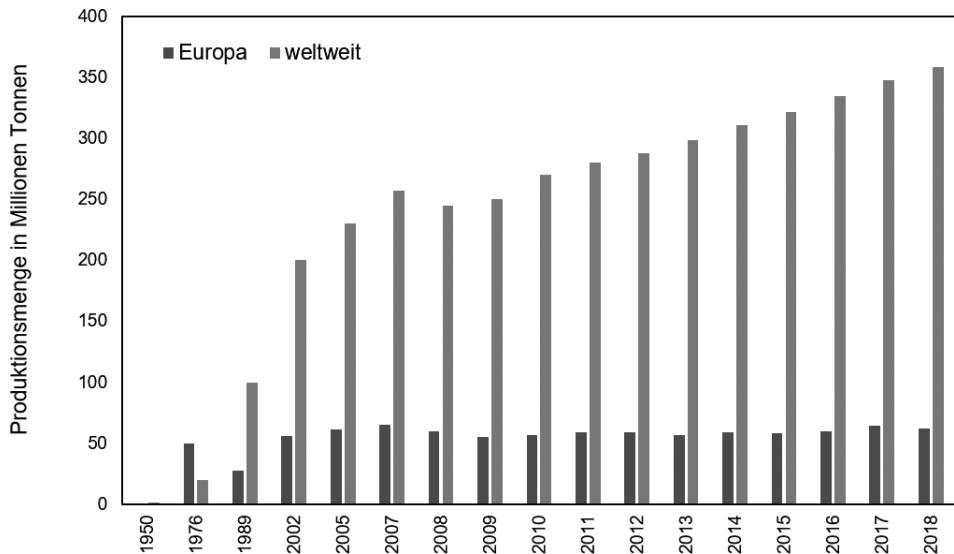


Bild 1.4 Kunststoffproduktion in Europa und weltweit von 1950 bis 2018 [nach Statista]. In diesen Zahlen sind alle thermoplastischen, duroplastischen und elastomeren Polymerwerkstoffe enthalten, zudem auch Klebstoffe, Beschichtungswerkstoffe, Dichtstoffe und Fasern aus Polypropylen. Nicht enthalten sind Fasern aus Polyethylenterephthalat („Polyester“), Polyamid und Polyacryl

Für Deutschland ist die Kunststoffindustrie volkswirtschaftlich – insbesondere auch für den Arbeitsmarkt – eine Schlüsselindustrie. Eingeteilt wird sie häufig in die Bereiche Kunststofferzeugung, Kunststoffverarbeitung und Maschinenbau (siehe Bild 1.5). Die Kunststofferzeuger produzieren Kunststoffe und entwickeln diese weiter, beispielsweise durch Modifikation des chemischen Aufbaus oder Zugeabe geeigneter Zusatzstoffe. Kunststoffverarbeiter erzeugen aus den Kunststoffen funktionsgerechte Fertigteile, wobei häufig höchste Ansprüche an die Bauteilqualität gestellt werden. Schließlich entwickelt und produziert der Kunststoff-Maschinenbau spezialisierte Anlagen und Werkzeuge für einen kunststoffgerechten und wirtschaftlichen Verarbeitungsprozess. Mit rund 336 000 Erwerbstätigen im Jahr 2019 ist die von kleinen und mittelständischen Unternehmen geprägte Gruppe der Kunststoffverarbeiter von außerordentlicher Bedeutung für den deutschen Arbeitsmarkt. Im Jahr 2019 umfasste die gesamte Kunststoffindustrie 3510 Unternehmen und erzielte einen Umsatz von rund 97 Milliarden Euro.

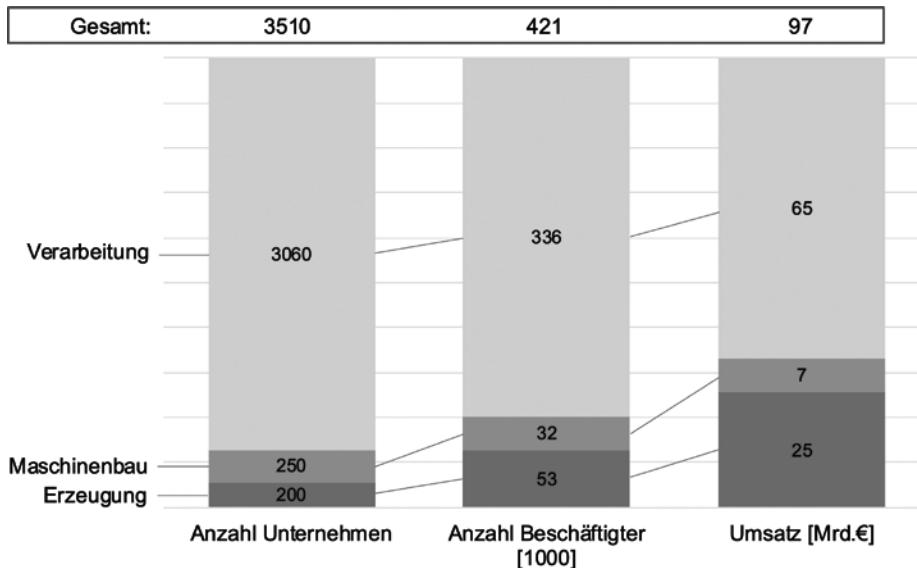


Bild 1.5 Struktur der Kunststoffindustrie in Deutschland im Jahre 2019 [nach PlasticsEurope]

■ 1.5 Kunststoffe im Kreislauf

Kunststoffe zeichnen sich durch eine Vielzahl positiver Eigenschaften aus und sind für viele Anwendungsbereiche unverzichtbar. Trotz der Vorteile von Kunststoffen gegenüber anderen Materialien werden sie in den letzten Jahren zunehmend negativ wahrgenommen und in vielerlei Hinsicht kritisiert. Begriffe wie ökologischer Fußabdruck, Abfallvermeidung und Nachhaltigkeit prägen die Debatten. Kunststoffen werden in diesem Zusammenhang vor allem eine geringe Recyclingquote im Zusammenspiel mit der Kurzlebigkeit von Verpackungen und die unkontrollierten Einträge von Kunststoffabfällen in die Umwelt, besonders in Gewässer, zugeschrieben. Tatsächlich zeigen Untersuchungen, dass etwa 75 % der in den Weltmeeren gesammelten Abfälle aus Kunststoffen bestehen, die durch den Menschen in die marine Umwelt gelangt sind. Dies ist unter dem Begriff des „Marine Litter“ bekannt. Dabei handelt es sich vor allem um Verpackungsmaterialien sowie um Abfälle aus Fischerei und Schifffahrt. Ein weiteres Problem ist die wachsende Menge an Mikrokunststoffen („Mikroplastik“), also kleinen Kunststoffpartikeln mit einem Durchmesser von weniger als fünf Millimetern, die unkontrolliert, z.B. durch Reifenabrieb oder Auswaschung aus Bekleidung, in die Umwelt gelangen oder durch den Zerfall von Kunststoffprodukten entstehen. Mikroplastik steht in der Kritik, schwerwiegende Folgen für die Biodiversität und die Gesundheit von Lebewesen zu haben.

Vor dem Hintergrund weiterhin steigender Kunststoff-Produktionsmengen (siehe Abschnitt 1.4) ergibt sich die Forderung nach einem grundsätzlichen Umdenken in der Industrie und bei den Verbrauchern. In den Fokus gelangen die Entwicklung von hocheffizienten Recyclingverfahren, die Berücksichtigung der Rezyklierbarkeit bereits in der Phase der Produktentwicklung und intelligente Prozesse, die sich an die unterschiedliche Qualität recycelter und nicht recycelter Materialien anpassen, sowie biobasierte und biologisch abbaubare Kunststoffe als Alternative zu konventionellen Polymer-Werkstoffen; die Ansätze erstrecken sich notwendigerweise über alle Bereiche der Kunststofftechnik und fordern Rohstoffhersteller, Produktentwickler, Verarbeiter, Recycler und Maschinenbauer gleichermaßen heraus. Ein Leitgedanke für den Umgang mit den negativen Umweltauswirkungen der Kunststoffe ist das Konzept der Kreislaufwirtschaft, das im Folgenden näher erläutert wird.

1.5.1 Kreislaufwirtschaft

Der Begriff Kreislaufwirtschaft bezeichnet das gegensätzliche Modell zur Linearwirtschaft, in der hochwertige Materialien nach einer einmaligen Nutzung den Abfallströmen zugeführt werden und durch Verbrennung beziehungsweise Deponierung nicht mehr für eine weitere Nutzung zur Verfügung stehen. Demgegenüber ist die Kreislaufwirtschaft ein Modell, bei dem Werkstoffe so lange wie möglich durch Wiederverwendung (z.B. in Mehrwegsystemen), Reparatur, Aufarbeitung und Recycling in der Wirtschaft erhalten bleiben und so Abfälle und Ressourcenverbrauch reduziert werden. Bild 1.6 illustriert vereinfacht dieses Modell der Kreislaufwirtschaft.



Bild 1.6 Definition des Europäischen Parlaments zur Kreislaufwirtschaft (2018) (Quelle: EU)

Der Begriff Kreislaufwirtschaft geht über den des Recyclings weit hinaus und beschreibt eine ganzheitliche Betrachtung geschlossener Kreisläufe, die zu einer Reduzierung von Müll, Emissionen (insbesondere CO₂) und Ressourcen (Rohstoffe und Energie) führt. Zwar sind in Deutschland bereits wichtige Lösungen in der Abfallproblematik etabliert, jedoch müssen weitere Innovationen und langfristige ökologisch und ökonomisch sinnvolle Gesamtlösungen zur Umsetzung der bestehenden Herausforderungen erarbeitet werden, die sich von der Rohstoffbereitstellung und Produktentwicklung über die industrielle Produktion bis hin zum Handel, zu den Verbrauchern und zum Recycling erstrecken.

1.5.2 Kunststoffverwertung

Die Verwertung von Kunststoffen ist ein wichtiger Eckpfeiler auf dem Weg hin zu einem nachhaltigen Wirtschaftssystem. Um mögliche Kreisläufe zu beschreiben, werden derzeit sinnvollerweise fünf Pfade unterschieden, die vom Prinzip her hierarchisch zu interpretieren sind (s. Bild 1.7). Dies soll bedeuten, dass die erste Pri-

orität für ein gebrauchtes Kunststoffprodukt die Wiederverwendung sein soll. Danach werden gemäß der untenstehenden Auflistung Möglichkeiten des mechanischen Recyclings erwogen usw. Die Wahl des Verwertungsverfahrens ist allerdings auch abhängig von Kunststoffart, -zusammensetzung und Verschmutzungsgrad der Abfälle, wodurch die Grundvoraussetzung für qualitativ hochwertiges Recycling eine funktionierende Abfallsortierung und -analytik ist. Faktoren wie Materialverschmutzung oder schlecht trennbare Materialverbunde beeinflussen häufig die Umsetzung des aus der Perspektive des Kunststoffkreislaufs optimalen Verwertungswegs.

- Wiederverwendung

Der für viele Produkte ökonomisch und ökologisch sinnvollste Weg ist die mehrfache Nutzung. Als Beispiel dient bei Verpackungen die Mehrweg-PET-Flasche. Aufwände entstehen in diesem Zyklus durch Sammlung, Transport, Sortierung und Waschvorgänge. Bei der Wiederverwendung bleibt nicht nur der Werkstoff, sondern wesentliche Teile des Produktes erhalten. Bei Mehrwegflaschen werden allerdings Verschlüsse und Etiketten derzeit nicht als Produkt, sondern nur als Werkstoff wiederverwendet.

- Mechanisches bzw. werkstoffliches Recycling

Beim mechanischen Recycling werden die Produkte gesammelt, nach Werkstofftype sortiert, zerkleinert, gewaschen und regranuliert. Die Produkte werden also zerstört, der Kunststoff bleibt jedoch als Werkstoff mit seiner molekularen Struktur im Wesentlichen erhalten. Beim mechanischen Recycling ist zu unterscheiden zwischen Produkten aus einer Nutzungsphase, wie zum Beispiel einem Joghurtbecher, und Produkten aus einem Produktionsprozess, die dort als Reststoffe anfallen. Letztere lassen sich sehr sortenrein und in saubrem Zustand sammeln, während erstere meistens (Lebensmittel-)Rückstände enthalten und wegen der bestehenden Entsorgungssysteme aus der Masse wegen der Sortenvielfalt heraussortiert werden müssen. Dies wiederum erfordert einen wesentlich höheren Sortier- und Waschaufwand. Für das Recycling dieser beiden Abfalltypen haben sich daher auch zwei unterschiedliche Bezeichnungen ausgeprägt: Rezyklate aus dem industriellen Produktionsumfeld werden *Post Industrial Recycles (PIR)*, Rezyklate aus Produkten nach einer Nutzungsphase werden *Post Consumer Recycles (PCR)* genannt.

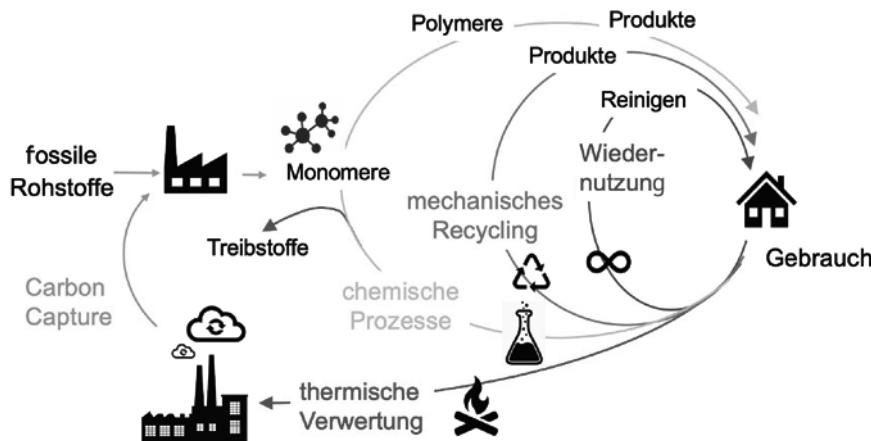


Bild 1.7 Pfade des Recyclings

■ Chemische Prozesse

Chemische Prozesse haben das Ziel, die chemische Struktur des Polymers aufzubrechen. Dabei werden die Makromoleküle in kleinere Fragmente zerlegt. Die Produkte der chemischen Prozesse sind dabei zwar prinzipiell Ausgangsstoffe für die erneute Synthese, allerdings sind diese Produkte auch sehr gut als Brenn- oder Treibstoff geeignet. Dieser Pfad erscheint zwar im Einzelfall ökonomisch sinnvoll, entzieht aber damit die Stoffe dem Kunststoffkreislauf (siehe Bild 1.7). Aus diesem Grunde werden chemische Prozesse nicht per se auch als Recyclingprozesse anerkannt.

In aller Regel sind chemische Prozesse energetisch wesentlich aufwendiger als mechanische Prozesse, weswegen chemische Prozesse derzeit nur unter bestimmten Bedingungen bzw. für bestimmte Werkstoffe wie Polystyrol, Polymethylmethacrylat, Polyurethan, Polyamid oder Polyethylenterephthalat diskutiert werden.

■ Thermische/energetische Verwertung

Für viele Kunststoffabfälle ist derzeit eine stoffliche Verwertung im Sinne eines mechanischen Recyclings oder einer chemischen Verwertung sowohl ökonomisch als auch ökologisch noch nicht praktikabel. Vor allem für die Trennung von Verbunden aus verschiedenen Kunststoffen, wie sie häufig in Verpackungsmaterial vorzufinden sind, gibt es derzeit noch keine zufriedenstellende Lösung. In diesen Fällen werden die Abfälle einer energetischen bzw. thermischen Verwertung zugeführt. Diese hat zum Ziel, die nicht weiter recycelbaren Kunststoffe durch eine vollständige und schadstoffarme Verbrennung zur Energiegewinnung zu nutzen. Hierzu werden Kunststoffabfälle als Brennstoffe in Kraftwerken, Hochöfen und Zementwerken eingesetzt. Auch

dieser Pfad entzieht diese Stoffe dem Kunststoffkreislauf, weswegen danach gestrebt wird, die Rezyklierbarkeit von Kunststoffprodukten bereits beim Design als Anforderung zu berücksichtigen („Design for Recycling“).

- Synthese aus CO₂-Abgasen („Carbon Capture“)

Ein weiterer Pfad eröffnet sich dadurch, dass auch die Abgase aus der thermischen Verwertung (wie auch aus allen anderen Verbrennungsprozessen) aufgefangen und zur Synthese neuer Monomere und Polymere genutzt werden. Dieser Pfad lässt sich dem Begriff *Carbon Capture and Utilization* (CCU) zuordnen, der allgemein die Abscheidung von CO₂ und deren Weiterverwertung bezeichnet. Auch in diesem Pfad ist die weitere Nutzung als Treib- oder Brennstoff aus rein ökonomischen Gründen oft naheliegender als die Synthese neuwertiger Polymere. Allerdings gibt es durchaus Unternehmen der chemischen Industrie, die demonstriert haben, dass so gewonnenes CO₂ bei der Synthese von Kunststoffen fossile Rohstoffe ersetzen kann. (Literaturangabe: „Cro-Co2Pet“)

Neben diesen fünf Pfaden wird derzeit stark der Weg verfolgt, bereits bei der Produktentwicklung bzw. dem Produktdesign den Faktor Rezyklierbarkeit miteinzubeziehen. Dies wird als recyclinggerechte Konstruktion bzw. *Design for Recycling* bezeichnet. Bedacht werden dabei z.B. die Auswahl der Materialien und die Demontier-, Sortier- oder Trennbarkeit im Recyclingprozess. Hier spielen Farbe, Etiketten und Bedruckungen eine Rolle, insbesondere aber die Bevorzugung von Monomateriallösungen. Über die Eignung eines Produktes für ein Leben nach dem Erstgebrauch entscheidet also maßgeblich der Produktentwickler.

Die Unterscheidung der verschiedenen chemischen Prozesse vom mechanischen Recycling soll anhand von Bild 1.8 kurz erläutert werden. Zu den physikalischen Prozessen gehören das mechanische Recycling wie auch einige solvolytische Prozesse.

Vorteilhaft ist beim mechanischen Recycling, dass die polymere Struktur im Wesentlichen erhalten bleibt. Einbußen müssen jedoch hinsichtlich des möglichen molekularen Abbaus und der Auswaschung von Additiven hingenommen werden. Dies kann zu dem sogenannten *Downcycling* führen. Dieser Begriff deutet an, dass die Rezyklate aus dem mechanischen Recycling nicht per se zu gleichwertigen Produkten verarbeitet werden können. Weiterhin ist die Qualität der Rezyklate von der Sortierung abhängig, die Verunreinigungen durch Fremdpolymere nicht immer vollständig verhindern kann. Die Rezyklate müssen teilweise erneut additiert werden.

Wie der Name andeutet, werden Kunststoffe bei der Solvolyse in einem geeigneten Lösemittel gelöst. Das Lösemittel muss dazu werkstoffspezifisch ausgewählt werden. Ein Lösungsvorgang löst dabei nur die Nebenvalenzkräfte auf, die zwischen den Makromolekülen herrschen. Die Makromoleküle selbst bleiben dabei in der

Lösung erhalten. Aus diesem Grunde handelt es sich in erster Näherung um einen physikalischen Prozess, wie er beispielsweise bei Polyethylenen stattfindet. Das Polyethylen kann anschließend aus der Lösung heraus gewonnen werden, braucht allerdings in aller Regel eine neue Additivierung.

Bei anderen Werkstoffen wie zum Beispiel Polyethylenterephthalat kann dieser Lösungsprozess je nach Lösemittel von einem Hydrolysevorgang begleitet werden, der parallel einen molekularen Abbau bewirkt. Dieser chemische Prozess hat zur Wirkung, dass anschließend das Molekulargewicht durch Synthesevorgänge wieder erhöht werden muss.

Der chemische Prozess „Depolymerisation“ zerlegt das Polymer in seine monomeren Bestandteile, die unmittelbar wieder zur Synthese genutzt werden können. Die so hergestellten Polymere stehen den ursprünglichen Werkstoffen in nichts nach. Dies ist allerdings nur für einige Kunststoffe, wie beispielsweise Polystyrol, möglich. Andere Kunststoffe lassen sich durch solche Prozesse nur in petrochemische Vorprodukte zerlegen, aus denen zwar auch Monomere erzeugt werden können, für die sich aber auch der Pfad der thermischen Verwertung eröffnet.

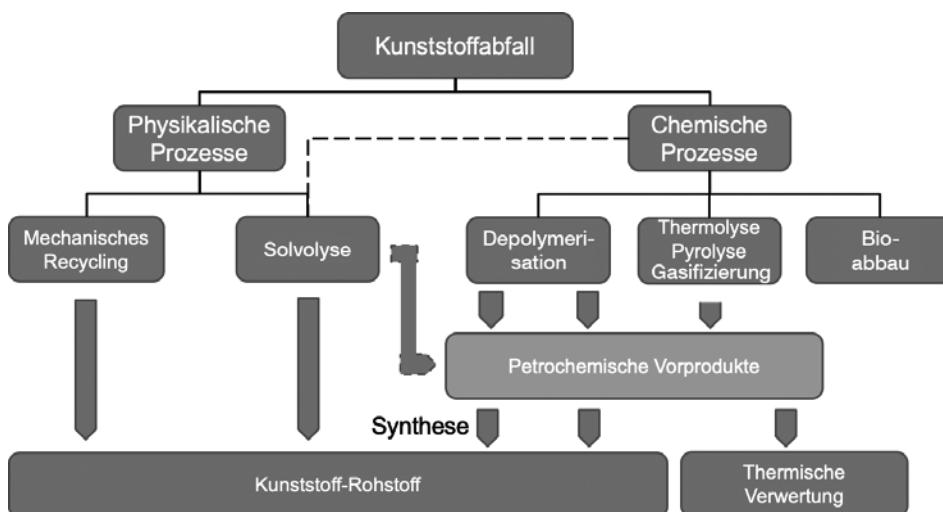


Bild 1.8 Merkmale physikalischer und chemischer Prozesse bei der Behandlung von Kunststoffabfällen

Thermolyse, Pyrolyse und Gasifizierung sind chemische Prozesse, die stark endotherm und daher energieintensiv sind. Aus diesem Grunde sind diese Prozesse nur dann attraktiv, wenn das mechanische Recycling z.B. aufgrund nur milderer Rezyklatqualität ausscheidet und zugleich ausreichend große Stoffmengen verfügbar sind. Das chemische Recycling benötigt in den meisten Fällen eine vorsortierte Fraktion und ist gegenüber dem Vorhandensein von Fremdstoffen nicht zwingend

toleranter als das mechanische Recycling. Dies gilt insbesondere, wenn Katalysatoren im Spiel sind.

Das chemische Recycling hat momentan deutschland-, europa- und weltweit vom Volumen her nur eine sehr ungeordnete Bedeutung. Chemische Recyclinganlagen kommen zurzeit über den Pilotstatus noch nicht hinaus. Die Masse chemisch rezyklierten Kunststoffs beläuft sich in Deutschland 2019 auf einen Anteil von weniger als 1% (10 kt) der Gesamtmasse verwerteten Kunststoffs (6,28 Mio. t). Etwa 46% der Gesamtmasse werden als mechanisch rezykliert (2,93 Mio. t) registriert, wo von ein Anteil von ca. 20% (580 kt) exportiert wird, ohne dass sichergestellt ist, wie dieser Anteil weiter verwertet wird. Derzeit wird der größte Teil der Kunststoffabfälle mit ca. 53% (3,31 Mio. t) energetisch verwertet.

In Deutschland werden folglich über 99% der Kunststoffabfälle verwertet. Betrachtet man hingegen die Menge an Kunststoffen, die tatsächlich in einen Kunststoffkreislauf zurückgeführt werden, so reduziert sich diese Quote auf ca. 33%. Das deutsche Verpackungsgesetz, das zum 1.1.2019 in Kraft getreten ist, sieht für 2022 eine Kunststoffkreislaufquote von 63% vor.

Weniger als 1% der Kunststoffabfälle werden in Deutschland deponiert und damit dem Kreislauf vollständig entzogen. Dieser Wert ist im direkten Vergleich zu vielen anderen europäischen Ländern vergleichsweise niedrig. Bild 1.9 zeigt die Situation zur Verwertung von Kunststoffabfällen in Europa. Europaweit liegt die Deponequote bei ca. 25% der Kunststoffabfälle. Das mechanische Recycling erreicht europaweit einen Anteil von etwa 31%; dabei ist allerdings zu beachten, dass sich über die Länder ein sehr breites Spektrum auftut. Das Ziel der EU, in 2025 50% und in 2030 55% aller Kunststoffabfälle zu rezyklieren, stellt dadurch starke Anforderungen an die Rezyklierkapazitäten und die Wiederverarbeitung von Rezyklaten.

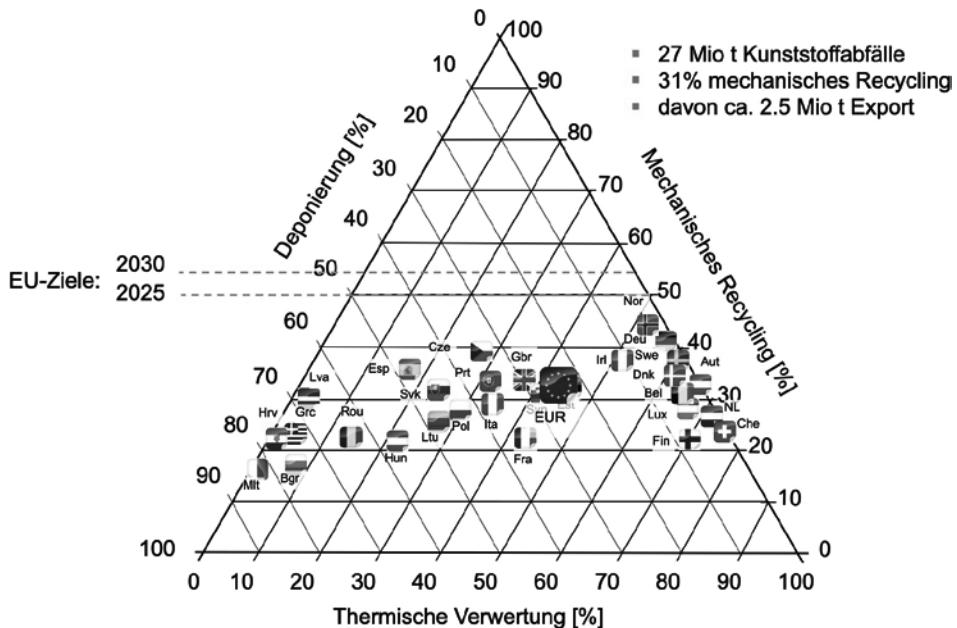


Bild 1.9 Verwertung von Kunststoffabfällen in Europa im Jahre 2017 [nach Lechleitner et al., EU2018, conversio 2018]

Um eine umfassende Umsetzung der Kreislaufwirtschaft zu ermöglichen, müssen die Technologien des stofflichen Recyclings deutlich weiterentwickelt und die Recycling-Kapazitäten drastisch erhöht werden. Dies allein wird aber nicht ausreichen, um die Ziele der Verpackungsverordnung und der EU-Richtlinie zu erfüllen. Dazu ist es auch notwendig, dass Rezyklate in erheblich größerem Maße in Produkten zum Einsatz kommen. Die Hemmnisse sind derzeit vielfältig: Zum einen liegen sie in der Gesetzgebung, die den Einsatz von Rezyklaten in bestimmten Bereichen wie im Lebensmittelkontakt derzeit nur sehr beschränkt zulässt. Zum anderen liegen Hemmnisse auch im hohen Preis im Vergleich zur Neuware. Da zugleich die Schwankungsbreite der Qualität von Rezyklaten deutlich höher ist als die von Neuware, ist bei deren Einsatz in üblichen Spritzgieß- und Extrusionsverfahren die Prozessstabilität durch Chargenschwankungen generell geringer. Weitere Hemmnisse zum Einsatz von Rezyklaten beziehen sich auf sich ändernde Produkteigenschaften wie Stippen in Folien, Geruchsbildung und Farbveränderungen, die zum Teil eine geringere Verbraucherakzeptanz erwarten lassen. Diese Themen werden die Kunststofftechnik in ihrer gesamten Breite in den kommenden Jahren sehr intensiv in Beschlag nehmen.

1.5.3 Biokunststoffe und alternative Rohstoffe

Auch wenn derzeit nur etwa 6 % der aus den Erdölraffinerien stammenden Produkte für die Herstellung und Verarbeitung von Kunststoffen verwendet werden, ist auf lange Sicht eine Reduktion des fossilen Anteils bei der Produktion von Kunststoffen notwendig, um CO₂-Einträge in die Atmosphäre aus fossilen Rohstoffen zu vermindern. Eine Möglichkeit besteht in der Herstellung von Polymeren aus alternativen, insbesondere nachwachsenden Rohstoffen, die in ihrem Wachstum CO₂ aus der Atmosphäre binden. Die wichtigsten Rohstoffe für die Herstellung von sogenannten biobasierten Kunststoffen sind Zucker, Stärke, Zellulose, Fette und Öle sowie Proteine und Lignine. Kapitel 2.4.6 geht auf biobasierte Kunststoffe näher ein.

Die Bioabbaubarkeit von Kunststoffen ist von der Herkunft der Ausgangsstoffe zunächst völlig entkoppelt. Es existieren Polymere sowohl fossiler wie auch biologischer Herkunft, die biologisch abbaubar sind. Kapitel 13.6.1 beleuchtet die Alterungsvorgänge bioabbaubarer Kunststoffe.

Zu den Biopolymeren gehört eine Vielzahl von Werkstoffen, die keiner einheitlichen Polymerklasse zuzuordnen sind und die sehr unterschiedliche Eigenschaften besitzen können. Es werden zudem Polymere als Biopolymere bezeichnet, die aus nachwachsenden Rohstoffen synthetisiert werden, wie auch solche, die durch biologischen Einfluss, wie beispielsweise Mikroorganismen, zersetzt werden können. Im allgemeinen Sprachgebrauch werden Biokunststoffe oftmals weniger mit der nachwachsenden Rohstoffbasis als vielmehr mit der Eigenschaft „biologisch abbaubar“ verknüpft; eine bekannte Anwendung sind z.B. Müllbeutel für kompostierbare Abfälle.

Konventionelle Kunststoffe sind i.A. nicht biologisch abbaubar, im Gegenteil versucht man sogar häufig, sie gegen jeglichen durch thermische oder mechanische Einflüsse bedingten Abbau zu schützen, da man im Allgemeinen Produkte mit einer langen Lebensdauer und anhaltender Funktionalität herstellen möchte. Es jedoch durchaus möglich, abbaubare Elemente in eine Polymerkette einzubauen, welche dann mikrobakteriell (bei Kompostierung) oder photochemisch zerstört werden. Vor allem die Diskussion um Kunststoff-Verpackungen, die nur für einen kurzzeitigen Gebrauch vorgesehen sind, macht biologisch, chemisch oder photochemisch abbaubare Kunststoffe interessant. Dies ist allerdings auf solche Abbauprozesse beschränkt, in denen die entstehenden Produkte, wie z.B. CO₂, einer weiteren Verwertung zugeführt werden können.

Ein Beispiel für einen derzeit relativ bekannten biobasierten Kunststoff ist Polylactid (PLA, auch Polymilchsäure genannt), das aus fermentierter Maisstärke hergestellt wird. PLA ist ein vergleichsweise spröder Werkstoff, dessen Eigenschaften sich jedoch durch Mischen mit anderen Kunststoffen, in der Regel mit Copolyestern und Additiven, in einem weiten Bereich einstellen lassen.

Auch für biobasierte Kunststoffe ist die Umweltverträglichkeit gesamtbilanziell zu betrachten: Wenn nicht auf Abfallprodukte aus der Lebensmittelproduktion (z.B. nicht essbare Pflanzenteile) zurückgegriffen werden kann, müssen große Ackerflächen für den Anbau der Pflanzen, die den Rohstoff liefern sollen, zur Verfügung stehen, die dann ggf. für die Nahrungsmittelproduktion fehlen. Auch können durch Maßnahmen zur Ertragsmaximierung, durch Transportvorgänge etc. weitere negative Umweltauswirkungen entstehen. Ebenso sind bei einer CO₂-Bilanzierung alle Faktoren zu berücksichtigen, die für das Säen, das Wachstum und die Ernte der Pflanzen erforderlich sind. Dadurch haben biobasierte Kunststoffe nicht per se einen günstigeren CO₂-Fußabdruck als Kunststoffe aus fossilen Rohstoffen (Quelle: LCA Biobased Polymers).

Marktsituation

Trotz des Zugangs dieser Werkstoffklasse in weitere Anwendungen des täglichen Lebens und ihrer verstärkten Präsenz im Supermarkt sowie in den Medien ist der Anteil der Biokunststoffe gemessen an der Gesamtproduktion von Kunststoffen mit weniger als 2% nach wie vor gering. Entsprechend einer Studie des Verbandes European Bioplastics lag die globale Produktion von Biopolymeren im Jahr 2016 bei etwa 2,05 Mio. Tonnen. 42,9% entfielen demnach auf biologisch abbaubare und 57,1% auf biobasierte (und nicht biologisch abbaubare) Kunststoffe. Gemäß der Studie wird für das Jahr 2020 eine weltweite Produktionskapazität von gerade einmal 2,19 Mio. Tonnen vorausgesagt. Vor zehn Jahren wurde hierfür noch ein Wert von 5 Mio. t prognostiziert.

Die tatsächlichen zukünftigen Marktentwicklungen hängen entscheidend von unterschiedlichen dynamischen Faktoren ab:

- Preisentwicklung bei den fossilen und den nachwachsenden Rohstoffen,
- Preisentwicklung bei konventionell hergestellten Produkten sowie der Entwicklung des Rohstoffkostenanteils,
- politische und rechtliche Rahmenbedingungen,
- Bereitschaft seitens der Industrie, neue Produkte in den Markt einzuführen,
- Bereitschaft zu Investitionen in den Bau und zur Optimierung größerer Produktionsanlagen.

Diese Faktoren haben sich trotz anderslautender Prognosen in den letzten Jahrzehnten nicht maßgeblich geändert. Der Hauptgrund dafür liegt darin, dass das Vorkommen von Rohstoffen fossiler Herkunft derzeit weit weniger einer Verknappung unterliegt, als dies zu früheren Zeiten bewertet worden war.

■ 1.6 Kunststofftechnik

Aus der Vielzahl an unterschiedlichen Kunststoffen, ihrem breiten Eigenschaftsspektrum und den immer weiter entwickelten Verarbeitungstechnologien resultiert eine hohe Komplexität in allen Prozessen, mit denen sich die Kunststofftechnik beschäftigt. Die Kunststofftechnik befasst sich dabei im weitesten Sinne mit der Werkstofftechnik, der (Weiter-)Entwicklung von Verarbeitungsverfahren und werkstoff- und verarbeitungsgerechten Konstruktionsweisen. Essenziell ist es dabei, die Wechselwirkungen zwischen Konstruktion, Werkstoff, Verarbeitung und Wiederverwertung zu berücksichtigen, was vor allem durch den Anspruch an eine Kunststoffkreislaufwirtschaft in Zukunft einen noch höheren Rang bekommen wird.

Die Konstruktion von Kunststoffprodukten muss dabei rezykliertechnische, werkstofftechnische wie auch verarbeitungstechnische Aspekte berücksichtigen. Sie ist in erster Linie auf die Eigenschaften und Funktionalitäten des Produkts gerichtet und muss dabei die werkstofflichen Voraussetzungen einfließen lassen. Die Konstruktion muss aber auch die verarbeitungstechnischen Gegebenheiten und Möglichkeiten berücksichtigen und dabei oftmals Kompromisse eingehen, weil vordergründig vorteilhafte Produkteigenschaften nicht zwingend vorteilhaft bei der Verarbeitung sind (und sich damit auch nachteilig auf die Produkteigenschaften auswirken).

Die mengenmäßig wichtigsten Verfahren der Kunststoffverarbeitung sind das Extrusions- und das Spritzgießverfahren. Das Extrudieren ist ein kontinuierlicher Prozess, in dem Endloseile wie Profile, Rohre oder Folien hergestellt werden. Das Spritzgießen als diskontinuierliches Verfahren wird zur Herstellung von Bauteilen mit teilweise hoher Komplexität in Bezug auf Geometrien und Funktionalitäten eingesetzt. Die additive Fertigung, im allgemeinen Sprachgebrauch als „3D-Druck“ bekannt, ist ein Verfahren, das in letzter Zeit ein deutliches Wachstum erfahren hat. Der Begriff „additive Fertigungsverfahren“ ist darauf zurückzuführen, dass das Werkstück Schicht für Schicht, „additiv“, aufgebaut wird, bis es sein vollständiges Volumen erreicht hat. Verfahren wie die Extrusion und das Spritzgießen hingegen nutzen Werkzeuge zur Formgebung der Produkte. Für eine Einführung in die Verfahren der Kunststoffverarbeitung sei auf die weiterführende Literatur verwiesen, beispielsweise [Hopmann/Michaeli: „Einführung in die Kunststoffverarbeitung“].

Bei der Herstellung von Kunststoffprodukten beeinflussen sich Konstruktion, Werkstoff und Verarbeitung gegenseitig. Sowohl das zu realisierende Produkt wie auch das ausgewählte Verarbeitungsverfahren stellen Anforderungen an Werkstoffe, die mitunter gegenläufig sind. Als Beispiel dient das Molekulargewicht, das im Hinblick auf gute mechanische Produkteigenschaften in der Regel hoch sein

sollte, was sich aber auf die Fließfähigkeit im Spritzgießprozess nachteilig auswirken kann. Die Konstruktion muss daher Produkt-, Verarbeitungs- und Wiederverwertungseigenschaften im Blick haben. Eine wesentliche Stütze ist dabei die Werkstofftechnik. Die Werkstofftechnik umfasst dabei ausgehend von polymeren Struktureigenschaften die Werkstoffentwicklung und die Werkstoffeigenschaften im Gebrauch und während der Verarbeitung auf einem ingenieurwissenschaftlichen Niveau. Ein durchgängiges und vollständiges Verständnis ist dabei ein Ziel der Werkstofftechnik, das allerdings nicht zuletzt aufgrund der großen Vielfalt verfügbarer Kunststoffe viele Lücken aufweist, die Bestandteil aktueller Forschungsarbeiten sind.

Dieses Buch bietet einen Überblick über die Eigenschaften von Kunststoffen. Dabei spielen die makromolekulare Struktur sowie Zusatzstoffe eine wichtige Rolle, da sie für die Ausbildung sowohl der Gebrauchs- als auch der Verarbeitungseigenschaften entscheidend sind. Daher wird dem Werkstoffverhalten in der Schmelze, den Bedingungen beim Erstarren aus der Schmelze und den sich daraus ausbildenden Eigenschaften besondere Bedeutung zugeordnet. Ziel soll es sein, ein gutes und weitgehend durchgängiges Verständnis des Werkstoffzustandes von Kunststoffen unter dem Einfluss der Verarbeitungs- und Gebrauchsbedingungen zu gewinnen.

Literatur zu Kapitel 1

- Baur, E.; Osswald, T. A.; Rudolph, N.: *Plastics Handbook*. München: Carl Hanser Verlag, 2019
- Baur, E.; Osswald, T. A.; Rudolph, N.: *Saechting Kunststoff-Taschenbuch*. München: Carl Hanser Verlag, 31. Aufl., 2013
- Braun, D.: *Simple Methods for Identification of Plastics*. München: Carl Hanser Verlag, 2013
- Braun, D.: *Erkennen von Kunststoffen*. München: Carl Hanser Verlag, 2012
- Braun, D.: *Kleine Geschichte der Kunststoffe*. München: Carl Hanser Verlag, 2017
- Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz: *Gesetz über das Inverkehrbringen, die Rücknahme und die hochwertige Verwertung von Verpackungen (Verpackungsgesetz - VerpackG)*. Berlin, 2017
- Conversio Market & Strategy: *Stoffstrombild Kunststoffe in Deutschland 2017*. Mainaschaff, 2018
- Endres, H.-J.; Siebert-Raths, A.: *Technische Biopolymere*. München: Carl Hanser Verlag, 2009
- European Commission (EU): *COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT, THE COUNCIL, THE EUROPEAN ECONOMIC AND SOCIAL COMMITTEE AND THE COMMITTEE OF THE REGIONS- A European Strategy for Plastics in a Circular Economy*. (2018) 28 final
- European Plastics e. V.: *European Bioplastics*, nova Institut, Köln, 2020
- Hopmann, C.; Michaeli, W.: *Einführung in die Kunststoffverarbeitung*. München: Carl Hanser Verlag, 2017
- Hopmann, C.; Schmitz, M.: *Plastics Industry 4.0*. München: Carl Hanser Verlag, 2020
- Lechleitner, A.; Schwabl, D.; Schubert, T.; Bauer, M.; Lehner, M.: Chemisches Recycling von gemischten Kunststoffabfällen als ergänzender Recyclingpfad zur Erhöhung der Recyclingquote. *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft* 72 (2019), S. 47 – 60; <https://doi.org/10.1007/s00506-019-00628-w>

- Lindner, L.; Schmitt, J.; Hein, J.: *Stoffstrombild Kunststoffe in Deutschland 2019*. Conversio Market & Strategy, Mainaschaff, 2020
- Naranjo, A.; Noriega, M., Osswald, T.A.; et al.: *Plastics Testing and Characterization*. München: Carl Hanser Verlag, 2012
- Osswald, T.A; Menges, G.: *Materials Science of Polymers for Engineers*. München: Carl Hanser Verlag, 2012
- Walker, S.; Rothman, R.: Life cycle assessment of bio-based and fossil-based plastic: A review. *Journal of Cleaner Production* 261, Elsevier, 10 July 2020

Sachverzeichnis

Symbolle

(NMR)-Spektroskopie 423
(thermo-)oxidative Alterung 527

A

abbaubare Kunststoffe 547
Absolutmethode 65
Absorption 439, 487
Absorptionskoeffizient 439
Adsorption 487
Aktivierungsenergie der Permeation 493
aliphatische Polyester 553
Alterung 519
Alterungsphänomene 520
Alterungsprozesse 527
Analyse, dynamisch-mechanische 263
Anisotropie 445
Antioxidantien 542
antistatische Ausrüstung 414
Aramidfasern 332
Arrheniusauftragung 494
Arrhenius-Funktion 244
ataktisch 80
Atombindung, kovalente 40
Aufbau, molekularer 35
Aufladung, elektrostatische 414
Autooxidation 529

B

basisch induzierte Hydrolyse 533
Bauteilgestaltung 281

Belastung, dynamische 309
Benzin 508
beschleunigte Alterung 550
Beulen 323
Bindung, kovalente 38
Bindung, polare 42
Bindungsenergie 40
biologische Beanspruchung 523
Biopolymere fossilen Ursprungs 553
Biostabilisatoren 546
Brechungsgesetz 434
Brechzahl 433, 436
Bruchenergie 284
Bruchversagen 281, 286
Burgers-Modell 249

C

chemische Alterungsvorgänge 522
Craze 284, 537
CVD-Verfahren 506

D

Dämmung 476
Dämpfung 471 f., 474, 476
Dämpfungsfaktor 473 f., 479
Deborah-Zahl 150
Deformationsmodell 256
Dehngeschwindigkeit 267
Dehnungs-Überhöhung 337
Desorption 487, 490
Dielektrizitätskonstante 408

- Diffusion 487, 489
 Diffusionskoeffizient 490
 Dipolkräfte 75
 Dispersion 437
 Dispersionskräfte 74
 Dispersionszahl 438
 DMA 472, 474
 Dotierung 418
 Druck-Durchsatz-Beziehungen 138
 DSC 543
 Durchgangswiderstand 402
 Duroplaste 36
- E**
- Eigenfrequenz 472, 475, 483
 Eigenschaften, elektrische 401
 Eigenschaften, magnetische 422
 Eigenschaften, piezoelektrische 419
 Eigenspannungen 538
 Einfriertemperatur 182
 Einlaufdruckverlust 161
 Einstein-Guth-Gold-Beziehung 137
 Elastizitätsmodul 475
 Elastizitätsmodul, komplex 472 f.
 Elastomere 36
 Elektrete 419
 elektromagnetische Abschirmung 416
 Elektronegativität 41
 Elektronenpaarbindung 41
 elektrooptische Polymere 420
 Energieabsorptionsvermögen 333
 Enthalpie 361 f.
 Entwicklung der Schadensthesen 563, 566
 Erfassung des Schadensumfeldes 563
 Extrudatschwellen 151
- F**
- Farbe 448
 Farbmessung 452
 Farbspektrum 453
 Faserorientierung 261
- Faserverstärkung 261
 Feder-Dämpfer-Modelle 249
 Fehler 559
 Ficksche Gesetze 489
 Flory-Rehner-Gleichung 91
 flüssigkristallin 93
 Folgeschäden 560
- G**
- Gefügeeinfluss 284
 Gelege 335
 Geräusch 470, 476 ff.
 Getränkeflaschen 507
 Gewebe 334
 Glanz 448
 Glanzmessungen 449
 Glasfasern 332
 Glastemperatur 87
 Glastemperatur, reduzierte 231
 Gleichgewichtsreaktion 52
 Gleitpaarungen 351
 GPC 67
 Grenzviskositätszahl 66
- H**
- HALS 545
 Hauptvalenzbindung 40
 Henrysches Gesetz 489
 Hindered Amine Light Stabilizers 545
 Hochbarrierewerkstoff 505
 hydrolytische Zersetzung 532
- I**
- Individualschaden 564
 Infrarotkamera 461
 Infrarotstrahlung 433
 innere und äußere Ursachen der Alterung 522
 intrinsisch leitende Kunststoffe 416
 Ionenbindung 42
 isochron 273
 Isolationsverhalten, elektrisches 402

isotaktisch 80
isotrop 328

K

Kaltversprödung 289
Kapillarrheometer 160
Kegel-Platte-System 166
Kennwertermittlung 263
Kennwertfunktion 275
klassische Laminattheorie 340
klimatische Beanspruchung 523
Knicken 323
Knittern 323
Kohlenstofffasern 331f.
Kollektivschaden 565
Kompostierung 547
Kontakttemperatur 376
Körperschall 465, 469, 479
Korrespondenzprinzip 253
Kraftstofftanks 507
Kriechen 241
Kriechmodul 329
Kristallinität 497
Kristallinitätsgrad 50
Kristallisation 92
Kristallitschmelztemperatur 87, 90
kritische Faserlänge 344
künstliche Alterung 550
Kunststoffe, amorphe 285
Kunststoff, faserverstärkter 330
Kunststoffkraftstoffbehälter 508
kurzfaserverstärkte Kunststoffe 342
Kurzzeitzugversuch 266

L

Lambert-Beersches Gesetz 439
Lastkollektive 525
Lautstärkepegel 470
Lebensdauervorhersage 550
Leitfähigkeit, intrinsische 416
Lichtschutzmittel 544
Lichtstreuung 462
Lichttransmission 443

Lösemittelviskosimetrie 65
Löslichkeit 489
Löslichkeitskoeffizient 489, 499
Lösungsenthalpie 493
Luftschall 465, 477, 480

M

Matte 334
Maxwell-Modell 246
Maxwell-Modell, erweitertes 250
mechanische/tribologische Beanspruchung 523
mediale Beanspruchung 523
Mehrschichtverbund 505
Membrane-Inflation-Rheometer 176
Memory-Effekt 254
Metalldesaktivatoren 545
Metallocen-Katalysatoren 50, 505
MFI 162
Mikroorganismen 524, 546
Mikrorisse 284, 537
Mischungsregel 338
Modellierung der Viskoelastizität 245
Molekülbindung 41
Moleküldurchmesser, effektiver 500
Moleküle, ungesättigte 44
Molekülorientierungen 538
Molmasse, gewichtsmittlere 60
Molmasse, viskositätsmittlere 61
Molmasse, zahlenmittlere 60

N

Nachstellversuche 569
Nebenvalenzkräfte 41
Netztheorie 340

O

Oberflächendefekte 153
Oberflächenwiderstand 405
Oligomere 52
Orientierung 257
Orientierungsdoppelbrechung 446

Oxidationsinduktionszeit (OIT) 543
 Ozon 531

P

Perkolationsschwelle 403
 Permeabilität 492
 Permeation 487, 490
 Permeationskoeffizienten 486
 Permeationsminderung 504
 Permeationsmodell 487
 Permeation von Dämpfen 501
 Permeation von Wasser 503
 Permittivität 408
 Peroxid 528
 PET-Flaschen 507
 physikalische Alterungsvorgänge 522
 Pigmentremission 451
PLA 548
 Platte-Platte-System 166
 Polarisationsfilter 445
 Polyacrylnitril 332
 Polyester 51
 Polyesteramide 554
 Polyesterharze, ungesättigte 54
 Polylactid 548
 Polymere 27f.
 Polymere, organische 30
 Polymere, teilkristalline 195
 Polymerisation, anionische 43
 Polymerisation, kationische 43
 Polymerisation, koordinative 50
 Polymerisation, radikalische 43
 Polysalze 94
 Präpolymer 54
 Primäre Antioxidantien 542
 Primärschäden 560
 Primärstruktur 78
 PVD-Verfahren 506
 p-v-T-Diagramm 202

Q

Quellspannung 539
 Quellung 502, 538

R

Radikale 528
 Radikalketten-Polymerisation 44
 Reflexionsgrad 441
 Reibung 344
 Reibungskoeffizienten 351
 Reibungswärme 348
 Relaxationszeit 247, 249
 Relaxieren 271
 Resonanz 472, 483
 Resonanz, magnetische 423
 resorbierbare Kunststoffe 548
 Rotationsrheometer 164
 Roving 333

S

sauer induzierte Hydrolyse 535
 Schaden 559
 Schadensanalyse 557
 Schadensanalyse an Elektroniksteckern 570
 Schadensanalyse an GFK-Hülsen aus Sicherungseinsätzen 582
 Schadensanalyse an PET-Mehrwegflaschen 572
 Schadensanalyse an PVDF-Bauteilen mit Rissbildungen 576
 Schadensanalyse an versprödeten PP-Heizungsrohren 579
 Schadensbild 561
 Schadenshergang 569
 Schadensthesen 568
 Schadenumfeld 562
 Schalldämmung 477
 Schalldämpfung 477f.
 Schalldruck 467, 469 f., 480
 Schalldruckpegel 469 f.
 Schalldruckpegel, A-bewertet 470
 Schallgeschwindigkeit 467
 Schallintensität 469
 Schallschnelle 467, 469
 Schallwelle 466 f., 478
 Schichtsilikat 505

Schlankheitsgrad 328
Schmelzebruch 155
Schmelzindex 67
Schmelzindexmessgerät 162
Schubbruch 323
schwarze Strahler 461
Schwindung 202
Schwingung 467, 469, 476, 479
Schwingung, mechanisch 465f., 469, 472, 476
Schwingungsverhalten 468, 471, 474, 476, 480f.
Schwingversuch 167
sekundäre Antioxidantien 542
Sekundärstruktur 84
shark skin 153
Shear Yielding 290
Siedetemperatur 499
Spannungs-Dehnungs-Diagramm, isochrones 273
Spannungs-Doppelbrechung 445
Spannungsriss 286
Spannungsrissbildung 540
Spannungsrisse 537
Spannungsrisskorrosion 540
Spannversuch 166
Speichermodul 473
Spektralphotometer 452
Stabilisatoren 541
Stauchung, kritische 325
Staudinger-Index 66
Steifigkeitserhöhung 262
Stereoisomere 79
sterische Hinderung 86
sterische Ordnung 79
Stick-Slip-Effekt 153
Stofftransport 492
strahleninduzierte Alterung 531
Strahlungsmessgeräte 461
Strahlungsmessung 461
Streuungskoeffizient 439
Strukturaufklärung 425
Struktur, morphologische 193
Stufenwachstumsreaktion 52

Superpositionsprinzip, Boltzmannsches 251f.
syndiotaktisch 80
systemische Schadensanalyse 558

T

Taber-Reibrad 355
Taktizität 50, 79
Temperaturbeanspruchung 523
Temperatureinfluss 241
Temperatur, kritische 499
Tempern 258
Thermoplaste 35
Time-Lag-Methode 514
Tragverhalten 281
Transmissionsgrad 441

U

UV-Absorber 544
UV-Quencher 545
UV-Strahlung 531

V

VDI-Richtlinie 3822 558
Verhalten, akustisch 465
Verlustmodul 473
Verlustzahl, dielektrische 411
Vernetzung 54, 90
Vernetzungsgrad 91
Versagensformen 323
Verschlaufungen 259
Verschleiß 352
Verschleiß, volumetrischer 353
Verstreckgrad 259
Verzweigungen 82
Viskoelastizität, linear 248
Viskoelastizität, nicht-linear 253f.
Viskosität, repräsentativ 139
Vlies 334
Volumenleitfähigkeit 402
Vulkanisation 54

W

- Wärmeeindringzahl 376
Wasserdampfpermeation 494
Wasserstoffbrückenbindungen 76
Weißbruch 285
Werkstoffkennwerte 274
wichtige Analysemethoden zur Schadensanalyse 568
Wirkungsquerschnitt 500

Z

- Zeiteinfluss 267
Zeit-Temperatur-Verschiebungsprinzip 242, 289