

### **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 Barrierschichten 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 Meeresstrudeln 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.

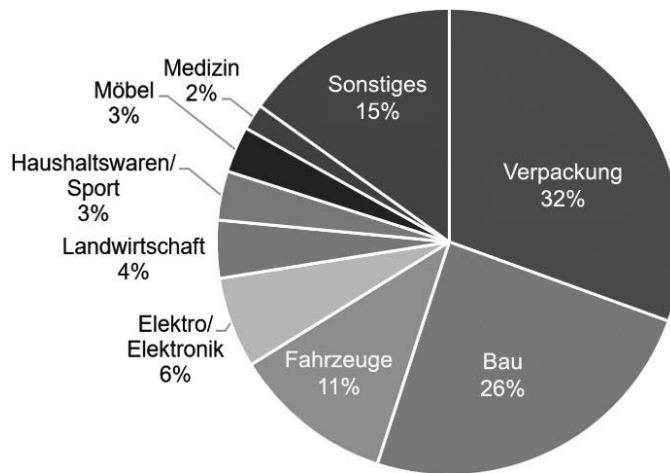
## ■ 1.3 Einsatzgebiete von Kunststoffen

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.

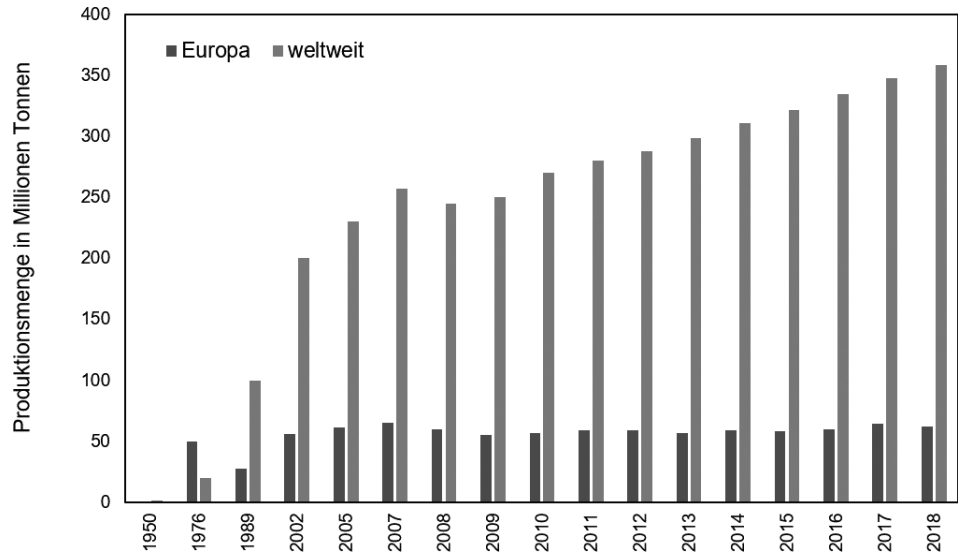


**Bild 1.3** Einsatzgebiete von Kunststoffen in Deutschland 2017 [nach PlasticsEurope, Conversio]

## ■ 1.4 Die Kunststoffindustrie

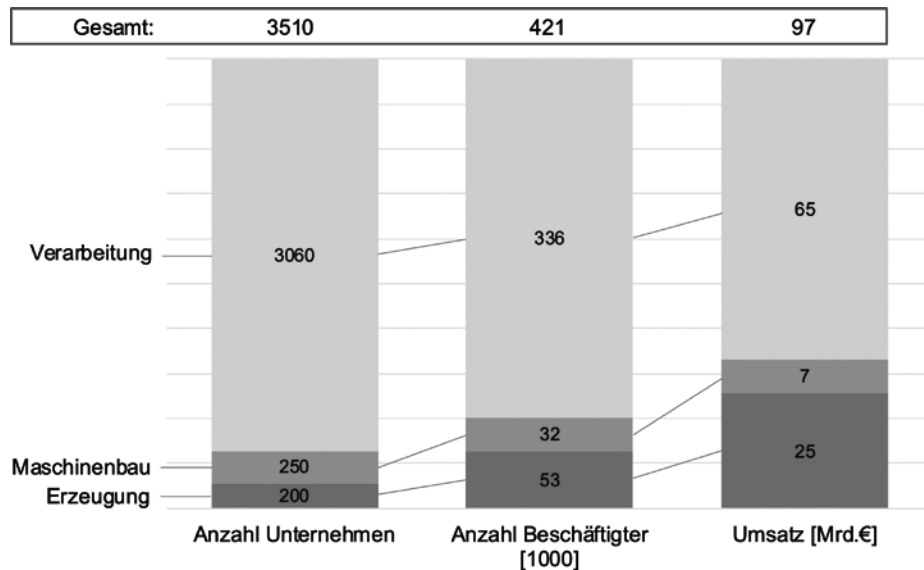
Seit dem Beginn der massenhaften Produktion von Kunststoff in den 1950er-Jahren wächst die Kunststoffproduktion weltweit stetig an (Bild 1.4). Zwischen den Ländern bzw. Weltregionen gibt es jedoch große Unterschiede beim Wachstum: Während die bereits große Kunststoffindustrie in Deutschland nur noch 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 Zugabe 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 CO<sub>2</sub>) 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-



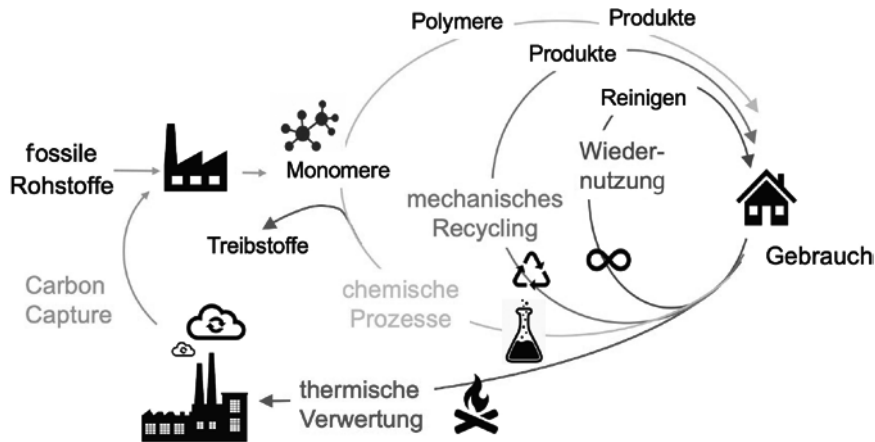
orität für ein gebrauchtes Kunststoffprodukt die Wiederverwendung sein soll. Danach werden gemäß der untenstehenden Auflistung Möglichkeiten des mechanischen Recyclings erwogen usw. Die Wahl des Verwertungsverfahrens ist allerdings auch abhängig von Kunststoffart, -zusammensetzung und Verschmutzungsgrad 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 sauberem 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 Recyclates* (PIR), Rezyklate aus Produkten nach einer Nutzungsphase werden *Post Consumer Recyclates* (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 rezyklierbaren 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 CO<sub>2</sub>-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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> bei der Synthese von Kunststoffen fossile Rohstoffe ersetzen kann. (Literaturangabe: „CroCo2Pet“)

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.

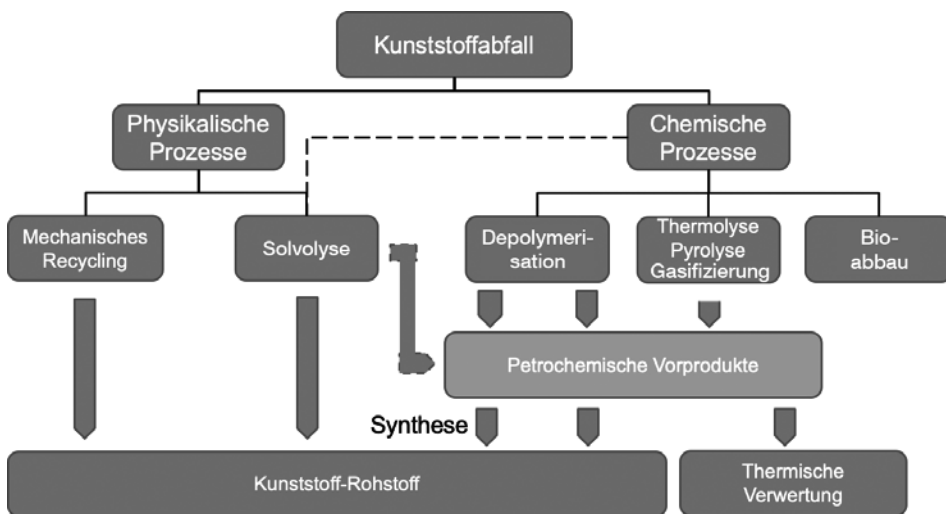
Vorteilhaft ist beim mechanischen Recycling, dass die polymere Struktur im Wesentlichen erhalten bleibt. Einbußen müssen jedoch hinsichtlich des möglichen molekularen Abbaus und der Auswaschung von Additiven hingenommen werden. Dies kann zu dem sogenannten *Downcycling* führen. Dieser Begriff deutet 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 additiviert 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

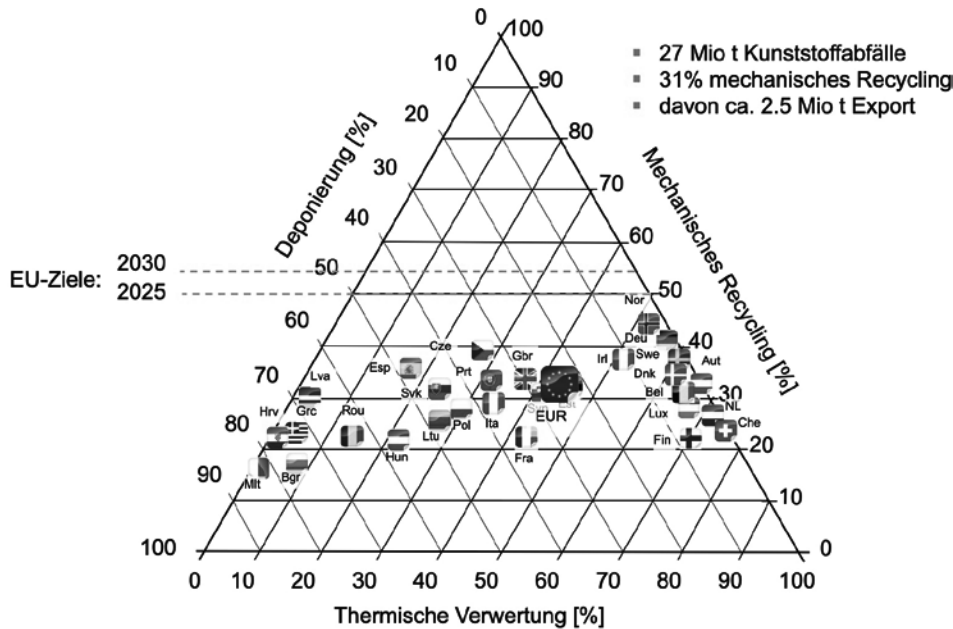
Thermolyse, Pyrolyse und Gasifizierung sind chemische Prozesse, die stark endotherm und daher energieintensiv sind. Aus diesem Grunde sind diese Prozesse nur dann attraktiv, wenn das mechanische Recycling z.B. aufgrund nur minderer Rezyklatqualität ausscheidet und zugleich ausreichend große Stoffmengen 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, wovon 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 Deponiequote 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 CO<sub>2</sub>-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 CO<sub>2</sub> 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. CO<sub>2</sub>, 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 CO<sub>2</sub>-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 CO<sub>2</sub>-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.: *Saechtling 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

## Symbole

(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  
Crazes 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

Nebenvaleanzkräfte 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  
Schadensumfeld 562  
Schalldämmung 477  
Schalldämpfung 477f.  
Schalldruck 467, 469f., 480  
Schalldruckpegel 469f.  
Schalldruckpegel, A-bewertet 470  
Schallgeschwindigkeit 467  
Schallintensität 469  
Schallschnelle 467, 469  
Schallwelle 466f., 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 465 f.,  
469, 472, 476  
Schwingungsverhalten 468, 471,  
474, 476, 480 f.  
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  
251 f.  
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 253 f.  
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**