

# 1

## Die Werkstoffgruppe der Kunststoffe

Die Welt der Technik umfasst Elemente von unterschiedlicher Art: Maschinen, Geräte, Computer, Fahrzeuge und viele mehr. Das Technischelement Werkstoffe gilt für Nichtspezialisten meist als notwendig, aber unspektakulär. Unter den Werkstoffen wiederum werden die Kunststoffe – allgemeiner gesagt die Polymerwerkstoffe – noch dazu häufig als problembehaftet angesehen. Eine genauere Betrachtung der Polymerwerkstoffe, deren Verarbeitung und der Produkte zeigt, dass sie **die** Werkstoffe des 20. und 21. Jahrhunderts sind, und dafür gibt es eine Fülle von Gründen. In diesem Einführungskapitel werden die wesentlichen Aspekte der heutigen Bedeutung von Polymerwerkstoffen, der Leistungen der Kunststofftechnik wie auch der Umweltproblematik bei der Nutzung von Kunststoffen sowie die Entwicklungsgeschichte dieser Werkstoffgruppe in kurzer Form aufgezeigt. In den nachfolgenden Kapiteln sollen die Inhalte behandelt werden, die zur werkstoffkundlichen Beschreibung von Polymerwerkstoffen erforderlich sind. Dabei ist es im Rahmen dieses Buches nicht möglich, die Elastomere (Kautschuk und Gummi) sowie die Duroplaste detailliert zu behandeln. Es werden lediglich einige Hinweise gegeben.

Die isolierte Betrachtung einer einzelnen Werkstoffgruppe ist nicht immer der Weg, um deren Platz in der Welt der Technik richtig einzuschätzen. Kunststoffe lassen sich häufig erst im Zusammenwirken verschiedener Werkstoffgruppen bei wichtigen Endprodukten umfassend beurteilen. Das zeigt sich schon bei der vielfältigen Produktgruppe der Kabel für Elektrotechnik, Elektronik, Computer- und Informationstechnik. Ein Kabel besteht aus Kupfer oder Glas für den Leiter und aus Thermoplasten oder Elastomeren für die Isolation. Ein Beispiel aus der Medizin sind Injektionsflaschen und Spritzen, die aus Glas, Kunststoff, Gummi und Metall bestehen. In einer Pandemie wird die Bedeutung des Testens und des Impfens mit allen dafür notwendigen Injektionsfläschchen und Injektionsspritzen schlagartig für jedermann sichtbar. Beispiele für Produkte, die prinzipiell nur in der Kombination verschiedener Werkstoffgruppen denkbar sind, finden sich in der gesamten Medizintechnik, ebenso im Automotive-Sektor.

In vielen anderen Fällen kann aber die auf den einzelnen Werkstoff fokussierte Betrachtung und Bewertung von reinen Kunststoffprodukten die richtige Sicht-

weise darstellen, so z. B. bei Rohren für die Wasserversorgung, bei Wärmedämmplatten im Bauwesen, bei technischen Teilen oder bei Schläuchen für die Medizintechnik.

Bevor konkret auf die grundlegenden Eigenschaften von Kunststoffen eingegangen wird, soll die geschichtliche Entwicklung der Polymerwerkstoffe in einem kurzen Abriss dargestellt werden.

## ■ 1.1 Geschichte der Kunststoffe

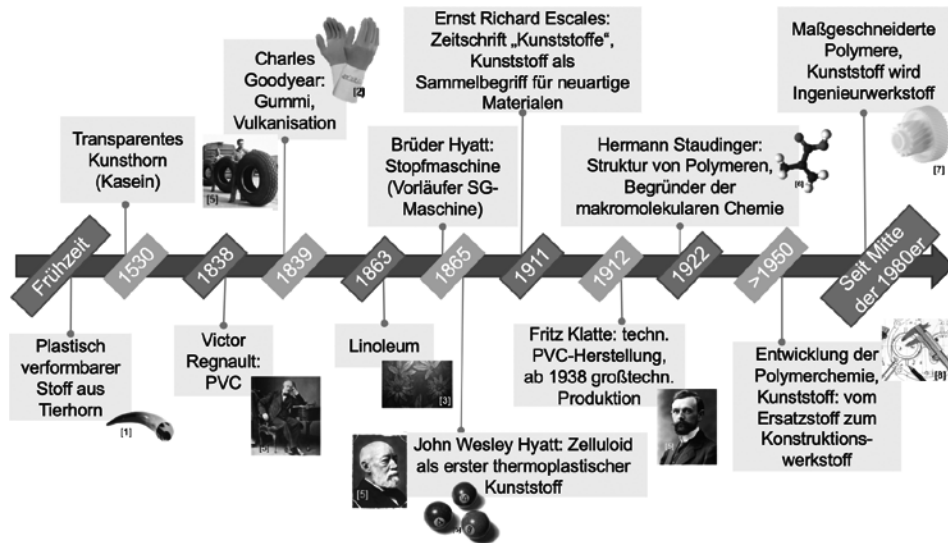
Seit jeher streben Menschen danach, Naturmaterialien für sich nutzbar zu machen und Werkstoffe zu entwickeln, deren Eigenschaften die der natürlichen Materialien übertreffen. Naturstoffe mit besonderen Eigenschaften waren z. B. der Naturkautschuk, das zähelastische und klebrige Guttapercha oder auch der Schellack, eine harzartige Substanz, welche aus den Ausscheidungen der Lackschildlaus gewonnen wird.

Die industrielle Herstellung von Polymerwerkstoffen zeichnete sich schon im 19. Jahrhundert ab, konnte aber wesentlich erst im 20. Jahrhundert realisiert werden. 1907 wurde Bakelit patentiert, der erste industriell produzierte vollsynthetische Kunststoff, ein Duroplast. Der erste Synthesekautschuk wurde 1909 patentiert. 1911 wurde dann der Begriff Kunststoff eingeführt. Die Erkenntnis der Existenz von Makromolekülen wurde erst 1920 von Hermann Staudinger postuliert, der auch diesen Begriff prägte. Er experimentierte übrigens u. a. mit Naturkautschuk und synthetisierte einen thermoplastischen Kunststoff. Jahrelang kämpfte er in der Chemie für die Durchsetzung dieser revolutionären Erkenntnis, die sich anschließend auch für einige andere Wissenschaftsgebiete als bahnbrechend erwies. 1953 erhielt er den Nobelpreis für Chemie.

Kunststoff wurde die prägende Werkstoffgruppe des 20. Jahrhunderts. Heute sind die diversen Kunststoffe und Verbundwerkstoffe aufgrund ihres unermesslich großen Einsatzspektrums essenziell in alle Lebensbereiche unverzichtbar integriert und in allen Branchen präsent. Aus ihrer massenhaften Verwendung resultieren heute aber auch schwerwiegende Entsorgungs- und Umweltprobleme.

Dieses einführende Kapitel beschreibt kurz die geschichtliche Entwicklung der Kunststoffe sowie die aktuelle Situation der Kunststoffindustrie. Wichtige Werkstoffeigenschaften und einige Einsatzgebiete werden kurz vorgestellt. Danach wird das Thema der Kreislaufwirtschaft für Kunststoffe behandelt, und abschließend wird die Bedeutung der Werkstofftechnik in der Kunststofftechnik in knapper Form aufgezeigt.

Bild 1.1 illustriert die Entwicklung der Kunststoffe anhand eines Zeitstrahls. Im Folgenden werden wichtige Werkstoffbeispiele und Entwicklungstrends dargestellt.



**Bild 1.1** Geschichte der Kunststoffe<sup>1)</sup>

Die möglicherweise bekanntesten Pioniere auf dem Gebiet der von Menschen hergestellten Polymere sind Victor Regnault und Charles Goodyear. Regnault stellte 1838 das erste Polyvinylchlorid (PVC) im Labor her, indem er das Gas Vinylchlorid den Strahlen der Sonne aussetzte. Charles Goodyear entdeckte im Jahr 1839, dass Naturkautschuk und Schwefel unter Wärmeeinwirkung zu dem wesentlich elastischeren und nicht mehr klebrigen Gummi reagieren und entwickelte daraus das Verfahren, das später als Vulkanisation bezeichnet wurde. Erste Produkte waren Gummischeuhe und Zeltplanen. Somit wurden für die ab Mitte des 19. Jahrhunderts für die aufkommende Elektrotechnik so wichtigen Isolationsmaterialien wie auch für die Reifentechnologie eine bedeutende Grundlage geschaffen. Der für Reifen notwendige elastische und abriebfeste Werkstoff Gummi wurde erst durch die Kombination von verschiedenen Kautschukpolymeren mit dem Füllstoff Ruß und mit weiteren Mischungsbestandteilen möglich.

Der erste bei höheren Temperaturen verformbare, thermoplastische Kunststoff auf Naturstoffbasis geht auf Wesley Hyatt zurück, der um 1844 nach einem Ersatzwerkstoff für die bis dahin aus Elfenbein gefertigten Billardkugeln suchte. Aus Nitrocellulose und Kampfer erzeugte er Zelluloid, das sich schnell über den Einsatz

<sup>1)</sup> Bildquellen: <https://www.nadeco.de>, <https://www.idealclean.de>, [wikipedia.de](https://www.wikipedia.de), <https://www.kern.de/>, <https://commons.wikimedia.org/>, <https://de.f-morat.com>, <http://www.smv-online.de/>

als Billardkugeln hinaus in verschiedensten Anwendungen etablieren konnte. Die wohl bekannteste Anwendung ist der Einsatz als Trägermaterial für fotografische Filme; auch Käämme, Messergriffe und Spielzeug wurden damals aus Zelluloid hergestellt.

Durch das Aufkommen neuer Materialien entstand auch der Bedarf an neuen Methoden, um diese in die gewünschte Form zu bringen. Eine der ersten Entwicklungen auf diesem Gebiet ist die „Stopfmaschine“ aus dem Jahr 1860, die die Gebrüder Hyatt zur Verarbeitung von Zelluloid entwickelten. Diese Maschine wird als ein früher Vorläufer heutiger Spritzgießmaschinen angesehen.

Ein weiterer Meilenstein auf dem Weg zur heutigen Kunststoffindustrie ist die Entwicklung der Polymerisation von Polyvinylchlorid (PVC) im technischen Maßstab durch Fritz Klätte. 1912 erhielt der deutsche Chemiker von der Chemischen Fabrik Griesheim-Elektron (Griesheim bei Frankfurt, später ein Produktionsort der Firma Hoechst) den Auftrag, für den in großen Mengen vorhandenen Rohstoff Ethen (Ethylen) neue Umsetzungsprodukte zu finden.

Mit der stetigen Entwicklung neuer Kunststoffe, Verarbeitungsmethoden und Anwendungen stieg auch der Bedarf nach fundiertem Wissen über die neue Werkstoffgruppe. Tatsächlich war zu Beginn des 20. Jahrhunderts noch kaum etwas über die Struktur der Materialien bekannt; erst mit den Arbeiten von Hermann Staudinger änderte sich dies in den 1920er-Jahren. Er prägte den Begriff des Makromoleküls und schuf die Grundlage für ein erstes Verständnis polymerer Werkstoffe.

Einen regelrechten Boom erfuhren Kunststoffe ab 1950. Es wurden zahlreiche Erfolge im Bereich der Polymerchemie erzielt und neue großtechnisch umsetzbare Verarbeitungsverfahren entwickelt, insbesondere für thermoplastische Kunststoffe. Waren Kunststoffe anfangs Ersatzstoffe oder Werkstoffe für einzelne technische Aufgaben, für die es noch gar keinen Werkstoff mit passenden Eigenschaften gab, so wurden sie nach und nach zu Werkstoffen für die industrielle Massenfertigung.

Mit dem steigenden Verbrauch von Erdöl nach dem zweiten Weltkrieg, bedingt vor allem durch die rapide Zunahme von Autos und den Wechsel von Kohle zu Öl für den Heizbedarf, entstand das dringende Bedürfnis bei den Herstellern der Brennstoffe, den Raffinerien, die beim Cracken entstehenden Abfälle (vor allem die Gase Ethylen und Propylen) einer Nutzung zuzuführen. Damals war gerade von Ziegler und Natta die katalytisch bewirkte Polymerisation der Polyolefine – Polyethylen und Polypropylen – erfunden worden. Die Großchemiekonzerne wurden nun auch zu Herstellern dieser Rohstoffe. Das war der Auslöser dafür, große Teile der Chemieerzeugung auf Erdölbasis umzustellen. Der neue Name war Petrochemie. Die Produktion von Polymerwerkstoffen in den Industrieländern wuchs damals boomartig um 10% pro Jahr. Die Gase, die zunächst noch als Abfälle verfügbar waren, reichten bald nicht mehr aus. Man war gezwungen, bei der Spaltung des Rohöls in

den Crackern eine besondere Qualität – das Naphta – als Rohstoff für die Polymerisation zu erzeugen.

Mit der Erdölkrise 1973 trat eine gewisse Dämpfung ein, die sich nach der zweiten Erdölkrise 1982 zu einer Bewegung für Ressourcenschonung ausweitete; mit der Forderung, Kunststoffe genauso wie Metalle zu recyceln. Die Tatsache, dass verschmutzte Kunststoffe aus Verpackungen oft auf wilden Müllkippen landeten, führte mitunter zu einer ablehnenden Haltung gegenüber Kunststoffen.

Neue Kunststoffe entstanden nicht nur durch die Synthese grundlegend neuer Polymere; mehr und mehr wurden die vorhandenen Kunststoffe in ihrer Molekülstruktur modifiziert. Polymergemische und die vermehrte Verwendung der verschiedensten Füll- und Verstärkungstoffe brachten eine wesentliche Erweiterung des Eigenschaftsspektrums. Die Ansprüche an die Endprodukte wuchsen weiter und es wuchsen auch die Ansprüche an die Fertigungstechnologien. Zahlreiche „maßgeschneiderte“ Polymerwerkstoffe für spezielle Anwendungen und ebenso die Ausdifferenzierung der Verarbeitungstechniken prägten die Entwicklung der Kunststofftechnik insbesondere seit Mitte der 1980er-Jahre.

## ■ 1.2 Die Eigenschaften von Kunststoffen

Im Folgenden werden die wichtigsten Eigenschaften von Kunststoffen benannt und einige Einsatzgebiete und konkrete Anwendungen beispielhaft aufgezeigt.

### **Dichte**

Die Dichte von Kunststoffen liegt überschlägig betrachtet im Bereich zwischen  $0,8 \text{ g/cm}^3$  und  $2,2 \text{ g/cm}^3$ . Im Vergleich dazu betragen die Dichten von Aluminium  $2,7 \text{ g/cm}^3$  und von Eisen  $7,9 \text{ g/cm}^3$ , Keramiken bewegen sich im Bereich von  $3,7 \text{ g/cm}^3$  bis  $4,0 \text{ g/cm}^3$ . Trotz der geringen Dichte ist das mechanische Leistungsspektrum von Kunststoffen sehr weitreichend. Sie können weich und dehnbar, aber auch hart und steif sein.

Die Polymerwerkstoffe mit ihrer geringen Dichte haben in modernen Autos einen Gewichtsanteil von ca. 20 bis 25 % (Elastomere und Polymerfasern mit eingeschlossen). Hier hat das Leichtbau-Prinzip seit langem nicht nur die Substitution von Stahl durch Leichtmetalle vorangetrieben, sondern auch die Substitution von Leichtmetallen durch Kunststoffe. Es ist üblich, die einzelnen mechanischen Eigenschaften zur Dichte ins Verhältnis zu setzen; die Vorteile von Kunststoffen und Faserverbundkunststoffen gegenüber den Metallen werden dabei am deutlichsten erkennbar. Der Elektroantrieb für Fahrzeuge bietet heute ganz neue Möglichkeiten durch Kunststoffe, aber auch Herausforderungen für Kunststoffe, nicht nur in Karosserie und Innenraum, sondern auch im Motorraum selbst.

Der Flugzeugbau hatte im Leichtbau seit jeher eine Vorreiterrolle. Bei Verkehrsflugzeugen können heute nicht nur große Bauteile wie das Seitenleitwerk, sondern auch der gesamte Rumpf in Faserverbund-Kunststoff-Bauweise gefertigt werden. Weil Kohlefasern hier so dominant sind, wird in der Umgangssprache meist nur von „Carbon“ gesprochen und der Kunststoffanteil gar nicht mehr erwähnt; bei Sportgeräten ist das ähnlich. Der generelle Nutzen der Leichtbauweise im Fahrzeug- und Flugzeugbau liegt sowohl in der Reduktion des Treibstoffverbrauchs als auch in der Reduktion klimaschädlicher und gesundheitsschädlicher Emissionen.

### **Mechanische Eigenschaften**

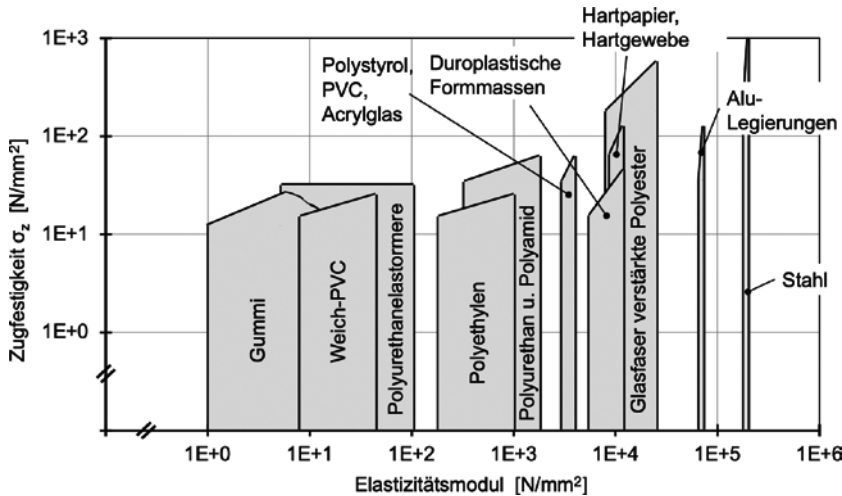
Für einige mechanische Eigenschaften von Kunststoffen liegen die Werte um Größenordnungen unter denen von Metallen oder Keramiken. Dazu zählen beispielsweise die Steifigkeit und die Festigkeit. Kunststoffe haben aber auch bestimmte mechanische Eigenschaften, die denen von Metallen und Keramiken deutlich überlegen sind. Sie sind beispielsweise wesentlich besser dehn- und biegsam und sie haben eine deutlich bessere Schlagzähigkeit. Dadurch sind Kunststoffe beispielsweise sehr gut in der Lage, bei schlagartigen Belastungen Energie zu absorbieren, wodurch sie sich für den passiven Personenschutz im Fahrzeugbau etabliert haben.

Bild 1.2 zeigt eine Gegenüberstellung der E-Moduln verschiedener Kunststoffe sowie von Aluminium und Stahl. Man beachte dabei die doppelt-logarithmische Auftragung. Die geringere Steifigkeit (E-Modul) und Festigkeit lassen sich teilweise durch konstruktive Maßnahmen, teilweise auch durch das Einbringen von verstärkenden Fasern kompensieren. Auch hier bietet die Kunststofftechnik viele Möglichkeiten. Allerdings bleibt gegenüber Metallen und Keramiken eine relativ starke Abhängigkeit dieser mechanischen Eigenschaften von der Temperatur als Nachteil erhalten, was stets zu berücksichtigen ist.

Charakteristisch für die Kunststoffe ist neben ihrer Temperaturabhängigkeit ein mehr oder weniger ausgeprägtes viskoelastisches Spannungs-Dehnungs-Verhalten. Praktisch betrachtet zeigt sich diese Viskoelastizität in einer Neigung zum sog. Kriechen, d. h. in einer fortschreitenden Zunahme der Dehnung bei anhaltender Belastung. Nach der Entlastung bildet sich diese Deformation nach einer definierten Funktion über der Zeit ganz oder nur teilweise zurück.

Die Bedeutung von Füllstoffen in der Kunststoffwerkstofftechnik wird häufig unterschätzt. Füllstoffe können zur Erzielung bestimmter mechanischer Eigenschaften von großer Bedeutung sein, insbesondere dann, wenn die Partikelgröße im Bereich von nur einigen bis zu einigen hundert Nanometern liegt. Man spricht von Nano-Füllstoffen. Sie werden in Kunststoffen wie in Elastomeren eingesetzt. Nanoskaliger Ruß war schon von Anfang an für Reifen wie für viele andere Gummiprodukte unverzichtbar. Die wissenschaftlichen Erkenntnisse über Nano-Füllstoffe haben sich erst nach und nach entwickelt. Das Netzwerk aus Rußpartikeln – oder

heute auch aus Silicapartikeln – ist neben dem Polymerketten-Netzwerk mitbestimmend für die mechanischen Eigenschaften von Elastomeren. Heute wird in Kunststoffen wie in Elastomeren neben den konventionellen Füll- und Verstärkungsstoffen eine ganze Palette verschiedenster Nanofüllstoffe genutzt.



**Bild 1.2** Zugfestigkeit und Elastizitätsmodul verschiedener Werkstoffe

### Isolation

Kunststoffe sind in erster Linie hervorragende Isolatoren. Im Bauwesen können Kunststoffe dank ihrer herausragenden thermischen Isolationseigenschaften und Langlebigkeit einen besonderen Beitrag zur Energieeinsparung leisten. In der Elektrotechnik waren isolierte Kabel für die Energieverteilung und für elektrische Maschinen bereits bei deren ersten Entwicklungen essenziell. Heute sind Elemente der Mikroelektronik, Computertechnik und Telekommunikation oder die organischen Leuchtdioden in Displays (OLED) allgegenwärtig und ohne Kunststoffe nicht denkbar.

Mit den guten elektrischen Isolationseigenschaften sind aufgrund der molekularen Struktur stets auch die guten thermischen Isolationseigenschaften gekoppelt. Allerdings existieren Anwendungen, die konträre Anforderungen stellen, wie zum Beispiel eine gute elektrische Isolationswirkung bei gleichzeitig guter Wärmeableitung. Dies kann man bei Kunststoffen durch Zugabe geeigneter Füllstoffe recht gut gezielt einstellen, wodurch Kunststoffe insbesondere in der Leistungselektrik und -elektronik eine große Verbreitung gefunden haben.

### **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.

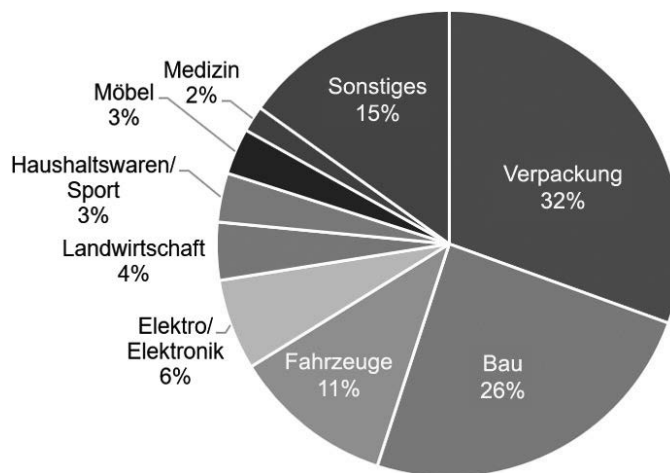
## ■ 1.3 Einsatzgebiete von Kunststoffen

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.

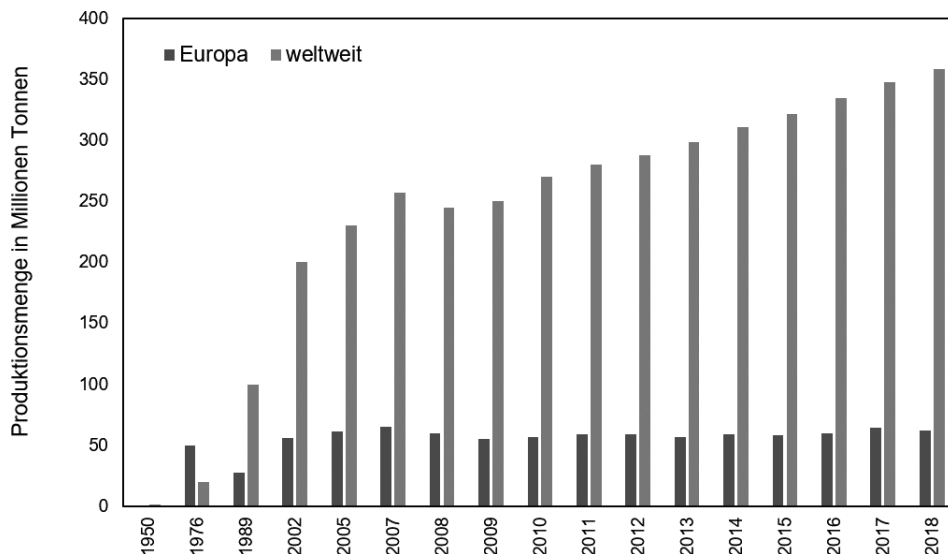


**Bild 1.3** Einsatzgebiete von Kunststoffen in Deutschland 2017 [nach PlasticsEurope, Conversio]

## ■ 1.4 Die Kunststoffindustrie

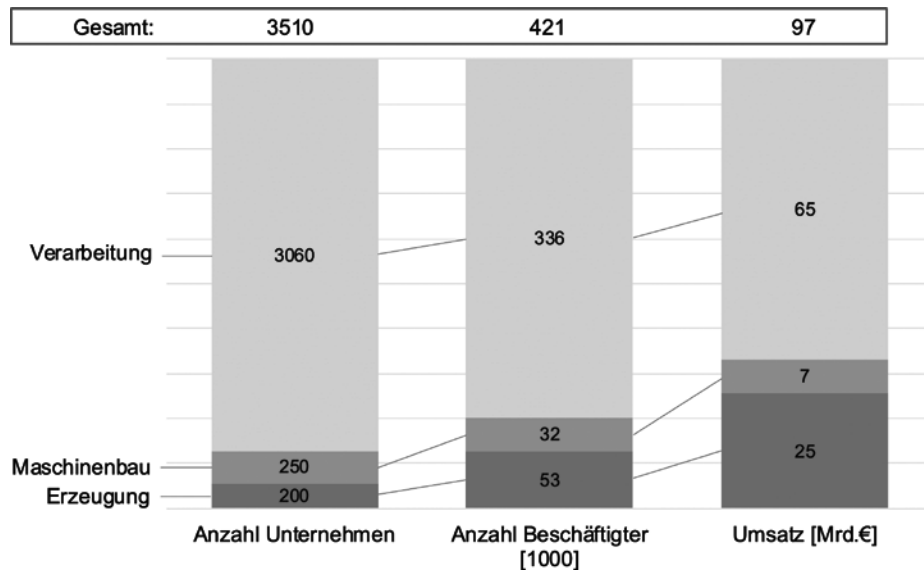
Seit dem Beginn der massenhaften Produktion von Kunststoff in den 1950er-Jahren wächst die Kunststoffproduktion weltweit stetig an (Bild 1.4). Zwischen den Ländern bzw. Weltregionen gibt es jedoch große Unterschiede beim Wachstum: Während die bereits große Kunststoffindustrie in Deutschland nur noch 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 Kunststoffherzeugung, Kunststoffverarbeitung und Maschinenbau (siehe Bild 1.5). Die Kunststoffherzeuger 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  $\text{CO}_2$ ) 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.

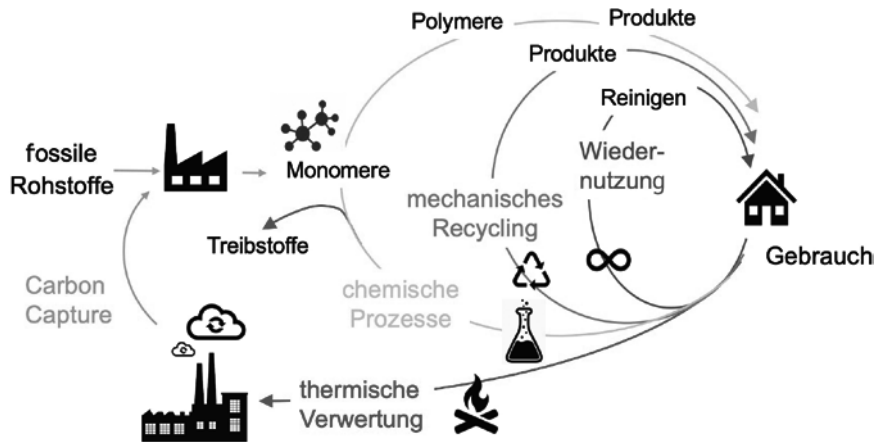
- Wiederverwendung

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.

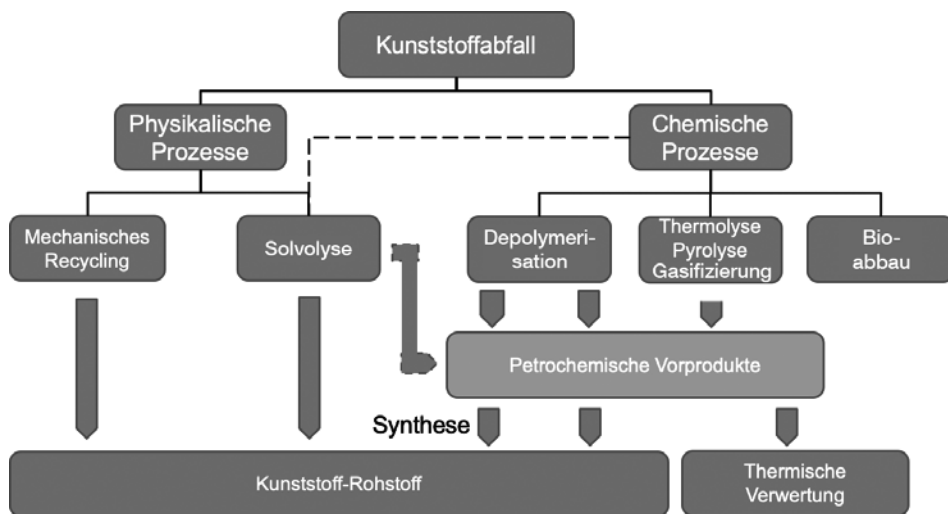
Vorteilhaft ist beim mechanischen Recycling, dass die polymere Struktur im Wesentlichen erhalten bleibt. Einbußen müssen jedoch hinsichtlich des möglichen molekularen Abbaus und der Auswaschung von Additiven hingenommen werden. Dies kann zu dem sogenannten *Downcycling* führen. Dieser Begriff deutet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

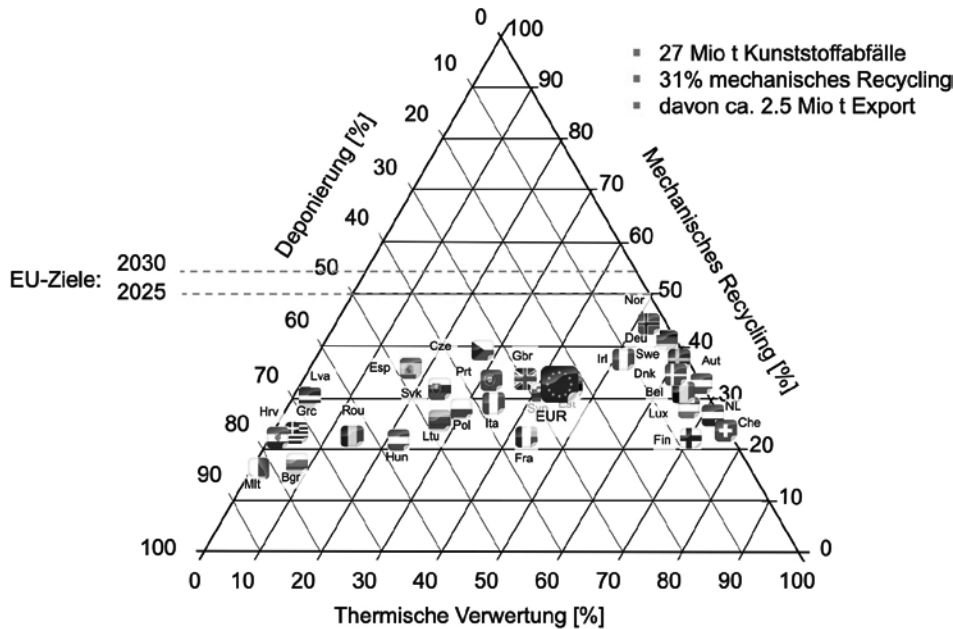
Thermolyse, Pyrolyse und Gasifizierung sind chemische Prozesse, die stark endotherm und daher energieintensiv sind. Aus diesem Grunde sind diese Prozesse nur dann attraktiv, wenn das mechanische Recycling z. B. aufgrund nur minderer Rezyklatqualität ausscheidet und zugleich ausreichend große Stoffmengen 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 Endlostteile 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>