Petra Weißhaupt

# Rezyklateinsatz

## Kunststoffrecycling neu denken



HANSER

Weißhaupt
**Rezyklateinsatz**



**Bleiben Sie auf dem Laufenden!**

Hanser Newsletter informieren Sie regelmäßig über neue Bücher und Termine aus den verschiedenen Bereichen der Technik. Profitieren Sie auch von Gewinnspielen und exklusiven Leseproben. Gleich anmelden unter

*www.hanser-fachbuch.de/newsletter*

Petra Weißhaupt

# Rezyklateinsatz

Kunststoffrecycling neu denken

HANSER

Print-ISBN: 978-3-446-48827-4
E-Book-ISBN: 978-3-446-48886-1

Die allgemein verwendeten Personenbezeichnungen gelten gleichermaßen für alle Geschlechter.

Alle in diesem Werk enthaltenen Informationen, Verfahren und Darstellungen wurden zum Zeitpunkt der Veröffentlichung nach bestem Wissen zusammengestellt. Dennoch sind Fehler nicht ganz auszuschließen. Aus diesem Grund sind die im vorliegenden Werk enthaltenen Informationen für Autor:innen, Herausgeber:innen und Verlag mit keiner Verpflichtung oder Garantie irgendeiner Art verbunden. Autor:innen, Herausgeber:innen und Verlag übernehmen infolgedessen keine Verantwortung und werden keine daraus folgende oder sonstige Haftung übernehmen, die auf irgendeine Weise aus der Benutzung dieser Informationen – oder Teilen davon – entsteht. Ebenso wenig übernehmen Autor:innen, Herausgeber:innen und Verlag die Gewähr dafür, dass die beschriebenen Verfahren usw. frei von Schutzrechten Dritter sind. Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt also auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benützt werden dürften.

Die endgültige Entscheidung über die Eignung der Informationen für die vorgesehene Verwendung in einer bestimmten Anwendung liegt in der alleinigen Verantwortung des Nutzers.

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet unter http://dnb.d-nb.de abrufbar.

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.
Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdruckes und der Vervielfältigung des Werkes, oder Teilen daraus, vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Einwilligung des Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder einem anderen Verfahren), auch nicht für Zwecke der Unterrichtsgestaltung – mit Ausnahme der in den §§ 53, 54 UrhG genannten Sonderfälle –, reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.
Wir behalten uns auch eine Nutzung des Werks für Zwecke des Text und Data Mining nach § 44b UrhG ausdrücklich vor.

© 2027 Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, München
Vilshofener Straße 10 | 81679 München | info@hanser.de
*www.hanser-fachbuch.de*
Lektorat: Dr. Mark Smith
Herstellung: Cornelia Speckmaier
Coverkonzept: Marc Müller-Bremer, www.rebranding.de, München
Covergestaltung: Max Kostopoulos
Titelmotiv: Max Kostopoulos
Satz: Eberl & Koesel Studio, Kempten
Druck: Elanders Waiblingen GmbH, Waiblingen
Printed in Germany

# Inhalt


**Vorwort** ..... **XI**

**Die Autorin** ..... **XIII**

**1 Das Zeitalter des Kunststoffs** ..... **1**

1.1 Die globale Plastikkrise ..... 1

1.2 Bewirtschaftung von Kunststoffabfällen ..... 6

1.2.1 Kreislaufwirtschaft ..... 6

1.2.2 Erweiterte Herstellerverantwortung ..... 8

1.2.3 Ende der Abfalleigenschaft ..... 9

1.3 Rezyklate ..... 10

1.3.1 PIR und PCR ..... 10

1.3.2 Rezyklateinsatz ..... 11

1.3.3 Zertifizierungen ..... 12

1.4 Bemessung von Zirkularität ..... 13

1.4.1 Recyclingfähigkeit ..... 13

1.4.2 Quoten ..... 15

1.4.3 Maße für Zirkularität ..... 15

1.5 Ökonomie und Ökologie des Recyclings ..... 17

1.5.1 Ökonomie des Recyclings ..... 17

1.5.2 Ökobilanz des Recyclings ..... 19

1.5.3 Klimaschutz durch Recycling ..... 23

**2 Herstellung, chemisches Recycling und Verarbeitung ..... 27**
2.1 Produktionsmenge ..... 27
2.2 Herstellung und chemisches Recycling ..... 29
2.2.1 Polyolefine ..... 29
2.2.2 Polyvinylchlorid ..... 31
2.2.3 Polyethylenterephthalat ..... 33
2.2.4 Polystyrol ..... 34
2.2.5 Styrol-Copolymere ..... 35
2.2.6 Polyamide ..... 36
2.2.7 Polycarbonat ..... 39
2.2.8 Polymethylmethacrylat ..... 41
2.2.9 Polyurethan ..... 44
2.3 Verarbeitung von thermoplastisch verformbaren Kunststoffen und Rezyklaten ..... 46
2.3.1 Compoundieren und Recompoundieren ..... 46
2.3.2 Physikalische Eigenschaften ..... 50
2.3.3 Mischbarkeit, Kompatibilität und Blends ..... 54
2.3.4 Verarbeitung ..... 60
2.4 Fazit ..... 61

**3 Werkstoffliches Recycling ..... 71**
3.1 Kunststoffabfälle ..... 71
3.2 Normen über das Kunststoffrecycling ..... 73
3.3 Werkstoffliche Aufbereitung ..... 76
3.3.1 Handsortierung ..... 76
3.3.2 Zerkleinerung ..... 77
3.3.3 Siebklassierung ..... 80
3.3.4 Windsichter und Luftherde ..... 81
3.3.5 Eisenmetallscheider ..... 81
3.3.6 Nichteisenmetallscheider ..... 81
3.3.7 Paddelsichter ..... 82
3.3.8 Dichtetrennung ..... 82
3.3.9 Triboelektrostatische Sortierung ..... 84
3.4 Sensorbasierte Identifikations- und Trennverfahren ..... 85
3.4.1 NIR-spektroskopische Methoden ..... 85

3.4.2 MIR-spektroskopische Methoden . . . 88
3.4.3 Raman-Spektroskopie . . . 89
3.4.4 Laserinduzierte Plasmaspektroskopie . . . 90
3.4.5 Digitale Wasserzeichen . . . 91
3.4.6 Tracerbasierte Sortierung . . . 91
3.4.7 Objekterkennung . . . 93
3.5 Reinigung und physikalisch-chemische Aufbereitung . . . 94
3.5.1 Trockenreinigung . . . 94
3.5.2 Nassreinigung . . . 95
3.5.3 Lösungsmittelbasierte Reinigung . . . 96
3.5.4 Trocknung . . . 97
3.5.5 Feuchtemessung . . . 105
3.5.6 Schmelzefiltration . . . 106
3.6 Chemikaliensicherheit, Schadstoffe und Schadstoffanalytik . . . 107
3.6.1 Schadstoffe . . . 107
3.6.2 Nachweis von Schwermetallen in Kunststoffen . . . 109
3.6.3 Nachweis von Halogenen in Kunststoffen . . . 110

**4 Verpackungen . . . 119**
4.1 Mengenströme . . . 119
4.2 Gesetzgebung und Normung . . . 121
4.2.1 Europäische Verpackungsverordnung . . . 121
4.2.2 Schadstofffreiheit . . . 126
4.2.3 Lebensmittelkontakt . . . 129
4.2.4 Nationales Durchführungsgesetz . . . 130
4.2.5 Normen über das Verpackungsrecycling . . . 131
4.3 Sortierung von Verpackungsabfällen . . . 132
4.3.1 Status quo . . . 132
4.3.2 Verbesserungspotenzial . . . 140
4.4 Recycling unterschiedlicher Verpackungskunststoffe . . . 140
4.4.1 Folien . . . 140
4.4.2 Starres HDPE . . . 145
4.4.3 Starres PP . . . 146
4.4.4 PS und EPS . . . 146
4.4.5 Starres PET . . . 148

4.4.6 Verbunde ... 150
4.4.7 Andere Kunststoffe und schwarze Kunststoffe ... 151
4.5 Fazit ... 151

**5 Altfahrzeuge und Elektro- und Elektronikaltgeräte ... 157**
5.1 Mengenströme ... 157
5.2 Gesetzgebung und Normung ... 162
5.2.1 Gesetzgebung der Altfahrzeugverwertung ... 162
5.2.2 Gesetzgebung der Aufbereitung von Elektro- und Elektronikaltgeräten ... 165
5.2.3 Schadstofffreiheit ... 167
5.2.4 Normen unter der Ökodesign-Verordnung ... 168
5.2.5 Normen für die Aufbereitung von Elektroschrott ... 169
5.3 Aufbereitungsverfahren ... 171
5.3.1 Altfahrzeuge ... 171
5.3.2 Elektro- und Elektronikaltgeräte ... 174
5.4 Kunststoffe in Altfahrzeugen und Elektro- und Elektronikaltgeräten ... 178
5.4.1 PP ... 178
5.4.2 PE ... 179
5.4.3 PS, EPS, HIPS ... 179
5.4.4 ABS, ASA, SAN ... 181
5.4.5 PC ... 182
5.4.6 PMMA ... 182
5.4.7 PA ... 183
5.4.8 PUR ... 183
5.4.9 Exkurs: Altreifen ... 184
5.5 Maßnahmen ... 189
5.5.1 Altfahrzeuge ... 189
5.5.2 Elektro- und Elektronikaltgeräte ... 190
5.5.3 Altreifen ... 192

**6 Bauprodukte ... 197**
6.1 Mengenströme ... 197
6.2 Gesetzgebung und Normung ... 202
6.2.1 Gesetzgebung ... 202
6.2.2 Normung ... 204

6.2.3 Schadstofffreiheit . . . . . 205
6.3 Erfassung von Kunststoffen aus dem Bereich des Bauens . . . . . 208
6.3.1 Freiwillige Rücknahmesysteme und Herstellerverantwortung . . . . 208
6.3.2 Sortierung von Kunststoffen . . . . . 211
6.4 Recycling bestimmter Bauprodukte . . . . . 212
6.4.1 Fenster, Profile und Rollläden . . . . . 212
6.4.2 Rohre . . . . . 214
6.4.3 Dämmstoffe . . . . . 218
6.4.4 Dichtungsbahnen . . . . . 220
6.4.5 Geokunststoffe . . . . . 220
6.4.6 Bodenbeläge . . . . . 221
6.4.7 Unterschiedliche Produkte aus PMMA . . . . . 222
6.5 Maßnahmen . . . . . 222

**7 Agrarkunststoffe und Fanggeräte . . . . . 227**

7.1 Mengenströme . . . . . 227
7.1.1 Kunststoffe aus Landwirtschaft, Forstwirtschaft, Gartenbau und Fischerei . . . . . 227
7.1.2 Kunststoffe aus Fanggeräten und Aquakulturausrüstung . . . . . 230
7.2 Gesetzgebung und Normung . . . . . 230
7.2.1 Agrarkunststoffe . . . . . 230
7.2.2 Fanggeräte und Aquakulturausrüstung . . . . . 231
7.3 Produktbeschreibungen . . . . . 233
7.3.1 Gewächshäuser und hohe, begehbare Schutzabdeckungen . . . . . 233
7.3.2 Tunnel und Schutzsysteme im Pflanzenbau sowie Mulchfolien . . . 234
7.3.3 Silofolien, Rundballennetze und Pressengarne . . . . . 238
7.3.4 Bewässerungssysteme, Pflanzhilfen und technische Ausrüstung . . . . . 239
7.3.5 Pflanztöpfe, Container und Erntekisten . . . . . 239
7.3.6 Chemisch kontaminierte Behälter und Verpackungen . . . . . 240
7.3.7 Fanggeräte . . . . . 241
7.3.8 Aquakulturausrüstung . . . . . 243
7.4 Stand der Recyclingtechnik . . . . . 245
7.4.1 Agrarkunststoffe . . . . . 245
7.4.2 Fanggeräte und Aquakulturausrüstung . . . . . 251

7.5 Maßnahmen ... 251
7.5.1 Agrarkunststoffe ... 251
7.5.2 Fanggeräte und Aquakulturausrüstung ... 253

**8 Siedlungsabfälle und Produktionsabfälle ... 257**
8.1 Mengenströme ... 257
8.1.1 Siedlungsabfälle ... 257
8.1.2 Produktionsabfälle ... 258
8.2 Gesetze und Normen ... 261
8.2.1 Rechtlicher Rahmen ... 261
8.2.2 Gewerbeabfallverordnung ... 262
8.2.3 Normen über Ersatzbrennstoffe ... 262
8.3 Recycling besonderer Siedlungsabfälle ... 266
8.3.1 Haus- und Sperrmüll ... 266
8.3.2 Matratzen ... 267
8.3.3 Windeln ... 271
8.3.4 Datenträger ... 272
8.3.5 Stoffgleiche Nichtverpackungen ... 274
8.3.6 Single-Use-Plastics ... 275
8.4 Recycling von Produktionsabfällen ... 277
8.5 Maßnahmen ... 281
8.5.1 Siedlungsabfälle ... 281
8.5.2 Produktionsabfälle ... 284

**9 Fazit und Maßnahmen ... 287**
9.1 Weltweite Abkommen ... 287
9.2 Europäische Gesetze ... 289
9.3 Neue Produktverantwortung ... 292
9.4 Technische Innovationen ... 295
9.4.1 Verpackungen ... 295
9.4.2 Altfahrzeuge sowie Elektro- und Elektronikaltgeräte ... 296
9.4.3 Kunststoffe aus Bau- und Abbruchabfällen ... 297
9.4.4 Agrarkunststoffe und Fanggeräte ... 298
9.4.5 Siedlungsabfälle und Produktionsabfälle ... 299
9.5 Anreize für mehr Rezyklateinsatz ... 300

**Index ... 305**

# Vorwort

Die Kunststoffwelt ist leicht, bunt und vielfältig. Sie wächst seit Jahrzehnten. Doch bietet sie nicht nur eine Fülle von Möglichkeiten, sondern auch Herausforderungen. Abfälle belasten die Umwelt derart, dass das Umweltprogramm der Vereinten Nationen ein Abkommen initiierte. Trotz hoher Motivation war die Einigung schwieriger als erwartet und scheiterte im Jahr 2025. Wie kann die Welt nun ohne eine gemeinsame Strategie ein wachsendes Problem behandeln? Spezialisierte und regionale Konzepte erscheinen zielführender denn je. Vor dem Hintergrund einer langen Kontroverse und einiger rechtlicher und technischer Veränderungen fasst das Buch unterschiedliche Ansätze des Recyclings zusammen. Grundlegend sind die Unterscheidung der Kunststoffe, die Methodenkenntnis des werkstofflichen und chemischen Recyclings sowie die rechtlichen Entwicklungen in Europa seit der Kunststoffstrategie im Jahr 2018. In Anlehnung daran widmet sich das Buch gerade auch Produkten und ihrem Recycling. Die Produkte sind Verpackungen, Elektro- und Elektronikgeräte sowie Fahrzeuge, Bauprodukte und Agrarkunststoffe. Zudem untersucht das Buch unerschlossene Potenziale, welche sich aus Siedlungs- und Produktionsabfällen ergeben könnten. So geht es beim Schließen von Kreisläufen nicht nur um Kunststoffsorten, sondern auch um branchentypische Voraussetzungen, Strukturen und Anforderungen. Zugleich setzt die Strategie des gezielten Rezyklateinsatzes neue Maßstäbe, da nun Produktanforderungen zu Anforderungen an das bereitstellende Recycling führen, vergleichbar mit dem klassischen Lieferkettenmanagement. Rezyklateinsatz impliziert eine gewisse Qualitätssicherung der Recyclingprozesse. Die kompakte und zugleich differenzierte Darstellung der technischen und organisatorischen Zusammenhänge vermittelt sowohl Möglichkeiten als auch Grenzen. Sie ist damit eine Basis für alle, die auf unterschiedlichen Ebenen in das Kunststoffrecycling einsteigen oder es weiterentwickeln möchten.

November 2026

*Petra Weißhaupt*

# Die Autorin



Dr. Petra Weißhaupt ist freie Autorin. Sie hat an der Technischen Universität Berlin Biotechnologie studiert und mit einer Studie über den Stickstoffmetabolismus von holzabbauenden Mikroorganismen im Fach Umweltmikrobiologie promoviert. Dazu war sie an der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung tätig. Anschließend beschäftigte sie sich als Mitarbeiterin am Deutschen Institut für Bautechnik mit Fragen der Bauchemie und Innenraumhygiene, bevor sie an das Umweltbundesamt wechselte. In den Fachgebieten für Produktverantwortung sowie später für Kunststoffe und Verpackungen begleitete sie sechs Ressortforschungsvorhaben über das Recycling von Rotorblättern sowie Verbundwerkstoffen aus Booten und Freizeitgeräten, Kunststoffen im Bereich des Bauens und schließlich über die Abfallbehandlung biologisch abbaubarer Kunststoffe. Zwei grundlegende Studien über den Rückbau von Windenergieanlagen entstanden ebenfalls unter ihrer Federführung. Zugleich war sie in der Normung tätig und unterstützte die Entstehung der Roadmap Circular Economy des DIN. Petra Weißhaupt ist Autorin mehrerer Fachartikel und des Buches „Wald- und Holzbau – Potenziale von Bauen mit Holz“, welches im Januar 2026 bei Springer Vieweg erschienen ist.

# 1
# Das Zeitalter des Kunststoffs

## 1.1 Die globale Plastikkrise

„Our Plastic Age“ war eine der ersten Artikelüberschriften, welche im Jahr 2009 die zweiseitige Entwicklung von Kunststoffen thematisierte (Thompson et al. 2009). Einerseits ist sie eine rasante wirtschaftliche Erfolgsgeschichte, andererseits sind massive Umweltverschmutzungen die Folge. Der Artikel beschreibt beides und beginnt mit der geschichtlichen Entwicklung. Die Erfindungen von Polystyrol im Jahr 1839 und Polyvinylchlorid im Jahr 1872 waren der Anfang für das, was 100 Jahre später den Alltag der Menschen deutlich verändern sollte. Der erste verbreitete Kunststoff war Bakelit im Jahr 1907. Die industrielle Produktion von Polyvinylchlorid und Polystyrol begann in den 1920er- und 1930er-Jahren. 1933 und 1941 folgten die Erfindungen von Polyethylen und Polyethylenterephthalat. Die Erfindung von Polypropylen lag im Jahr 1954. Aber erst in den 1960er- und 70er-Jahren wurden Kunststoffe zur Massenware. Bereits in den 60er-Jahren erkannten Forscher die Schäden für die Umwelt und insbesondere die Risiken für die Tierwelt. Die Bedenken konnten den wirtschaftlichen Erfolg aber nicht aufhalten. Seit den 1980er-Jahren stieg die Weltproduktion exponentiell an. Die fortschreitende Umweltverschmutzung alarmiert Umweltschützer. Kunststoffabfälle und Mikroplastik befinden sich auf allen Kontinenten, sogar in der Arktis (Bergmann et al. 2022). Trauriger Gipfel ist der North Pacific Garbage Patch (NPGP): ein 1,6 Millionen Quadratkilometer großer Müllstrudel im Pazifischen Ozean (Lebreton et al. 2022). Oft wird die Vermüllung der Gewässer an Ständen sichtbar (Bild 1.1).



**Bild 1.1** Strandgut, Bild von H. Hach auf Pixabay

„Production, use, and fate of all plastics ever made“ titelten Geyer et al. (2017) und wurden inzwischen mehr als 20 000-mal zitiert. Die Studie informierte, dass die globale Produktion im Jahr 2015 bei 380 Millionen Tonnen lag und sich die jährliche Menge bis zum Jahr 2040 noch verdoppeln könnte. Weltweit betrachtet sind die häufigsten Kunststoffe Polyethylen (36 Prozent), Polypropylen (21 Prozent) und Polyvinylchlorid (12 Prozent), gefolgt von Polyethylenterephthalat, Polyurethan und Polystyrol (< 10 Prozent jeweils). Von den Anfängen der Kunststoffsynthese bis zum Jahr 2015 wurde die überwältigende Menge von 8,3 Milliarden Tonnen Kunststoff geschaffen, von welchen 4,9 Milliarden Tonnen schlicht weggeschmissen wurden. Nur 800 Millionen Tonnen endeten in der Verbrennung, nur 600 Millionen Tonnen erfuhren ein Recycling. Die Zahlen verdeutlichen, wo das neue Entwicklungspotenzial liegt: in der Abfallbehandlung! In einem weltweiten Deponieverbot, welches das Hinterlassen von Kunststoffen in der Umwelt kategorisch und klar verbietet und sämtliche Abfälle in die Abfallverwertungsanlagen lenkt. Besser noch lenkt es sie in das Recycling oder die Wiederverwendung, um der maßlosen Verschwendung Einhalt zu gebieten.

„The Lancet Countdown on health and plastics“ war die Schlagzeile im Jahr 2025 (Landrigan et al. 2025). Die gesundheitlichen Risiken, welche von Kunststoffen ausgehen, sind nicht mehr zu leugnen. Bisphenole, Phthalate, bromierte Flammschutzmittel und per- und polyfluorierte Substanzen (PFAS) wurden im Rahmen von Human-Biomonitoring-Studien in Menschen gefunden. Von Mikro- und Nanoplastik in Blut-, Milch-, Leber-, Nieren-, Darm-, Plazenta-, Lungen-, Gehirn- und Herzproben wird berichtet. Bromierte Flammschutzmittel sind Teil von Hausstäuben. Kunststoffe und ihre Inhaltsstoffe befinden sich überall. Die Autoren der Studie raten zur Reduktion. Die United Nations Environment Assembly (UNEA) verfolgte bereits im März 2022 den Auftrag, ein international verbindliches Instrument zur Begrenzung der Plastikverschmutzung zu schaffen. Ein Global Plastics Treaty (UNEP 2022). Der Versuch ei-

nes weltweiten Abkommens im Jahr 2025 blieb allerdings ergebnislos. Vielmehr sind es einzelne Länder oder regionale Staatengemeinschaften, welche Maßnahmen ergreifen. Die Maßnahmen sind fragmentiert und ihr Wirkungskreis bleibt begrenzt. Umso größer ist der Handlungsbedarf.

Dass Deponierung weltweit immer noch eine vorrangige Stellung einnimmt, beschreiben Pottinger et al. (2024). Die Erhebungen kommen zu dem Ergebnis, dass derzeit 40 Prozent der Kunststoffe auf Deponien enden und 18 Prozent durch Missmanagement keiner Verwertung zugeführt werden. Nur weitere 18 Prozent werden recycelt, der Rest wird verbrannt. Während in Europa die Deponierung seit Jahren deutlich rückläufig ist und auch in China seit Jahren etwa konstant ist, steigt die Menge in Amerika und im Rest der Welt parallel zum wachsenden Kunststoffabfallaufkommen (Bild 1.2). Diese Tatsachen sind von grundlegender Wichtigkeit, wenn die Problematik im internationalen Kontext betrachtet wird. Vor diesem Hintergrund wirkt der Vorschlag der Produktionsobergrenzen zum Nachteil der Investitionen in Recycling oder energetische Verwertung wie wenig ambitioniertes Greenwashing. Dabei wäre diese Verpflichtung in Europa eine Ergänzung zu umfassenden Verwertungsstrukturen. Und auch China hat umfassende Maßnahmen gegen Missmanagement und Deponierung von Kunststoffabfällen unternommen, was bei einem rasanten Anstieg des Kunststoffverbrauchs in den vergangenen 10 Jahren offenbar geboten war.



**Bild 1.2** Abfalldeponie, Bild von vchal auf iStock

Die Rufe nach Verboten und Vermeidung sind laut und berechtigt, doch verhallen sie im Raum der Innovations- und Schaffensfreude sowie des Markterfolgs preiswerter und praktischer Produkte. Erfolgversprechend sind daher Konzepte, welche Umweltschutz zu einem Geschäftsmodell machen. Mechanismen, welche den Umweltschutz belohnen. Abfallsammlung und -behandlung müssen sich auszahlen. Das Prinzip der Plastikbank wurde schon sehr früh als Maßnahme der Entwicklungshilfe eingeführt.

Händisch gesammeltes Plastik wird gegen Bezahlung von Organisationen zurückgenommen. Zumeist hat es eine gute Qualität und eignet sich ausgezeichnet für das Recycling. Das Konzept ist vielerorts etabliert. Aber entspricht es einer flächendeckenden Abfallbewirtschaftung? Ersetzt es systematische Konzepte? Ist es in jedem Fall gesundheitlich unbedenklich? Ist es selektives Wastepicking, während der wahre Abfall in der Umwelt verbleibt? Die Fragen sind weltweit ähnlich und außer Zweifel steht, dass die Konzepte fortentwickelt werden müssen. Der Zeitpunkt der Vermeidung wurde sehr offensichtlich verpasst und auch eine Deckelung der Produktion wird die vorhandenen vier Milliarden Tonnen nicht aus der Umwelt entfernen. Wichtig wäre ein klares Bekenntnis zum Recycling und Konzepte, welche es fördern. Leider wird die unverzichtbare Abfallbehandlung oft als Greenwashing abgetan. Zuweilen nehmen Hersteller die erweiterte Herstellerverantwortung nicht ernst genug. Freiwillige Konzepte scheitern an der nötigen Initiative.

Dass die Herstellungsmengen überall auf der Welt steigen, stimmt nicht ganz. Die jährliche Produktionsmenge in Europa ist seit dem Jahr 2000 etwa konstant und liegt mit Schwankungen bei ungefähr 50 Millionen Tonnen. Bei 450,4 Millionen Europäern entspricht dies einem Verbrauch von 111 kg pro Kopf und Jahr. Bei einer Weltbevölkerung von 8,3 Milliarden Menschen entspräche dieser Verbrauch nahezu einer Milliarde Tonnen Kunststoff. Die Menschheit liegt mit einer Jahresproduktion von 460 Millionen Tonnen bei etwa der Hälfte (OECD 2024). Die Zahlen verdeutlichen das weltweite wirtschaftliche Potenzial und lassen zugleich erahnen, was es für die Umwelt bedeutet. Vermüllung ist ein Resultat des Wohlstandes, und gerade deshalb ist es Aufgabe der wohlhabenden Länder, Lösungen zu entwickeln. Weltweit betrachtet könnte die erweiterte Herstellerverantwortung ein Schlüsselinstrument sein.

Immer mehr Länder fordern einschneidende Maßnahmen. Europa hat die Problematik erkannt und im Jahr 2018 die Kunststoffstrategie veröffentlicht (COM 2018). Die Studie beinhaltete eine quantitative und qualitative Lagebestimmung. Damals wurden die folgenden Kunststoffmengen den Branchen zugeordnet. Die Mengenströme haben sich seither nur geringfügig verändert. Ziel der Strategie war es, Kunststoffe in sämtlichen Branchen unter Berücksichtigung der jeweiligen Produkt- und Abfallgesetzgebung zu recyceln. Im Zuge des Green Deals folgte dann die Überarbeitung von vielen europäischen Produkt- und Abfallgesetzen zur Stärkung der Kreislaufwirtschaft.

Es wurden zahlreiche europäische Gesetze überarbeitet und entsprechend mussten auch nationale Gesetze reformiert werden. Die Prozesse sind noch nicht abgeschlossen. Die nachfolgenden Kapitel beschreiben die Situation branchenspezifisch. Bild 1.3 und Bild 1.4 verdeutlichen, dass der größte Handlungsbedarf im Bereich der Verpackungen liegt. Aber auch Elektro- und Elektronikaltgeräte und Altfahrzeuge bieten unter den Maßgaben der erweiterten Herstellerverantwortung gute Rahmenbedingungen für die Fortentwicklung des Kunststoffrecyclings. Im Baugewerbe, in der Landwirtschaft und für bestimmte Haushaltskunststoffe gibt es freiwillige Recycling-

initiativen, welche oft beachtliche Potenziale bieten. Die Kapitel 4 bis 8 werden Aufschluss über branchenspezifische Kunststoffabfälle geben.

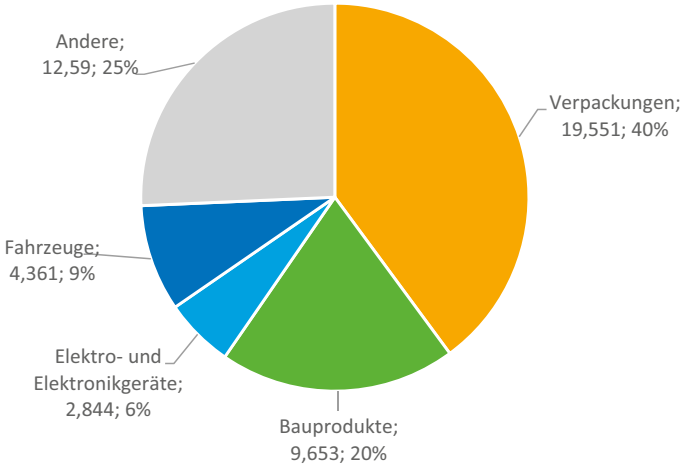



**Bild 1.3** Branchenbezogener Verbrauch von Kunststoffen in Millionen Tonnen und in Prozent von insgesamt 49 Millionen Tonnen in Europa im Jahr 2016 (nach EU-Kunststoffstrategie, COM 2018)

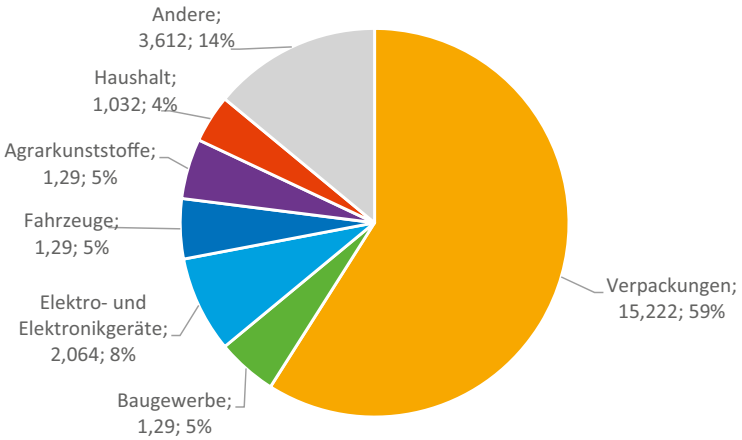



**Bild 1.4** Branchenbezogenes Abfallaufkommen von Kunststoffen in Millionen Tonnen und in Prozent von insgesamt 25,8 Millionen Tonnen in Europa im Jahr 2026 (nach EU-Kunststoffstrategie, COM 2018)

Das Buch beschränkt sich auf die marktbestimmenden Massenkunststoffe Polyethylen, Polypropylen, Polyvinylchlorid, Polyethylenterephthalat, Polystyrol, unterschiedliche Styrol-Copolymere, Polycarbonat, Polymethylmethacrylat und Polyurethan. Auf

die chemischen Unterschiede, die Herstellung und die Möglichkeiten des chemischen Recyclings wird in Kapitel 2 eingegangen. Chemisches Recycling besteht in aller Regel in einer Depolymerisation zu molekularen Bruchstücken, aber auch zu den ursprünglichen Monomeren. Die Reaktionen sind oft eng mit den Polymerisationsreaktionen verwandt und werden daher parallel vorgestellt. Im 3. Kapitel beschäftigt sich das Buch mit den die Abfallwirtschaft bestimmenden Methoden des werkstofflichen Recyclings. Abschließend werden im 9. Kapitel zusammenfassend Potenziale dargelegt und Instrumente für die Kreislaufschließung werden beschrieben.

## 1.2 Bewirtschaftung von Kunststoffabfällen

### 1.2.1 Kreislaufwirtschaft

Da Abfallbewirtschaftung seit Jahrzehnten streng reguliert ist, sind wesentliche Prinzipien rechtlicher Natur. So legen die europäische Abfallrahmenrichtlinie sowie auch das deutsche Kreislaufwirtschaftsgesetz bestimmte Grundsätze fest. Zu nennen ist der Grundsatz der schadlosen Verwertung. Das Hauptziel der Abfallwirtschaft ist die Schadensminimierung für Mensch und Umwelt. Ein anderer Grundsatz ist die Zumutbarkeit, welche auf das Verhältnis von Nutzen und Aufwand bei der Abfallverwertung abzielt. Schließlich gibt es den Grundsatz der fünfstufigen Abfallhierarchie, welche vorschreibt, dass die Vermeidung von Abfällen die höchste Priorität haben muss, dass es Möglichkeiten der Vorbereitung zur Wiederverwendung gibt, dass dem Recycling Vorrang vor der energetischen Verwertung eingeräumt wird und dass Beseitigung die letzte und streng regulierte Möglichkeit darstellt. Zugleich ermächtigt das Gesetz die öffentliche Hand, Abfälle zu sammeln und Gesetze zu erlassen. Von großer Bedeutung ist das Recht, nachgeordnete Gesetze der erweiterten Herstellerverantwortung zu schaffen und damit die Verantwortung für Abfälle verursachergerecht und verhältnismäßig auf die Hersteller zu übertragen. Dies geschah für die kunststoffreichen Abfälle von Verpackungen, Elektro(nik)altgeräten und Altfahrzeugen sowie auch für Batterien, Altöl und weitere Produkte innerhalb Europas. Diese Gesetze haben eine große Bedeutung für die Bewirtschaftung von Kunststoffabfällen und bieten den Rahmen für gesteigerte Anforderungen.

In dem Grundsatzpapier „Europa nach 2030 – Die Entwicklung der Abfallwirtschaft zu einem industriellen Standortfaktor“ beschreiben Gosten et al. (2025) den Stand der Abfallwirtschaft in Deutschland und nennen Ziele am Beispiel der Kunststoffverwertung. Der Beitrag beschreibt, wie sich die Kreislaufwirtschaft in Deutschland und Europa entwickelt hat und wohin die Entwicklung noch führen sollte. Die Wahl des Beispiels verdeutlicht, wie groß der Entwicklungsbedarf bezüglich des Kunststoffrecyclings ist. Während Stahl, Glas, Papier und Komposte seit Jahren erfolgreich im Kreis geführt werden, tut sich die Branche mit Kunststoffen schwer. Das hat unterschied-

liche Gründe. Einmal mehr braucht es angepasste Konzepte, welche dort beginnen, wo die Lebensdauer eines Produkts endet. Gosten et al. (2025) beschreiben einen Trend zu Abfallvermeidungskonzepten, welche am Produktdesign und damit noch vor der Markteinführung ansetzen. Von beschränkten Ressourcenkontingenten und von einer wachsenden Zahl von R-Strategien, von denen *rethink, redesign, reduce, reuse, repair, refurbish, remanufacture* und *repurpose* nur einige sind, wird berichtet. Und schließlich geht es um die Komplexitätsfalle der Regulierung dieser letzten Endes wirtschaftspolitischen Instrumente. Die Gedanken sind berechtigt, Gesetze dieser Richtung setzten sich sogar durch und doch bleibt der Erfolg mäßig. Abfall ist der Spiegel des Wohlstandes und der Verzicht auf Wohlstand bleibt eine trübe Aussicht.

Eine starke und hoch entwickelte Recyclingwirtschaft ist in den Industrienationen alternativlos, ein wichtiger Standortfaktor und ein weiteres Gebiet, auf welchem sich Technologieführerschaft behaupten lässt. Gerade auch diese Technologien können exportiert werden, denn mit wachsender Weltbevölkerung und wachsendem Wohlstand steigt die globale Nachfrage nach Infrastruktur, Ressourcenmanagement und Abfalltechnik. Und trotz so mancher Fortschritte seit der Einführung des Kreislaufwirtschaftsgesetzes in den 1980er-Jahren ist die Deponierung von Siedlungsabfällen weltweit betrachtet immer noch die vorherrschende Form der Abfallbewirtschaftung. Ein erschreckender Zustand, welcher der abfallwirtschaftlichen Theorie entgegensteht und welcher auch die immensen Einträge von Kunststoffen in die Umwelt erklärt. Zwar spielt Littering, das versehentliche Hinterlassen von Abfällen in der Umwelt, eine Rolle und ist ein Ansatzpunkt für Sensibilisierungsmaßnahmen. Das konzeptionelle Problem liegt jedoch in der Deponierung, welche auch innerhalb von Europa noch weit verbreitet ist. Das ist sehr schlecht, denn Deponien belasten nicht nur Böden, Gewässer und die Luft, sondern setzen auch erhebliche Mengen an Methan frei. Das Gas hat ein Treibhausgaspotenzial, das Kohlenstoffdioxid um das 28-fache übersteigt. Das Ziel der weltweiten Abfallwirtschaft muss es sein, Deponierung zu überwinden und durch Verwertungstechnologien zu ersetzen. Mit dem Verbot der Deponierung von heizwertreichen Abfällen schuf Deutschland eine wichtige Grundlage. Daraus resultiert die Notwendigkeit der Verwertung. Das europaweite Deponieverbot steht derzeit noch aus. Gosten et al. (2025) weisen darauf hin, dass neben einem Deponieverbot ein Exportverbot bestehen muss, damit Abfälle nicht zur Deponierung verbracht werden. Das Baseler Abkommen in Verbindung mit der Verordnung (EU) 2024/1157 erfüllt diesen Zweck. Es lässt aber Exporte zum Zweck des Recyclings zu, was im ungünstigen Fall ein Schlupfloch bedeutet. Auf der Ebene internationaler Abkommen schlagen Gosten et al. (2025) vor, die Vertragsstaaten mögen sich bald auf Vermeidungsziele einigen. Warum nicht der weltweite Ausstieg aus der Deponierung ein internationales Ziel sein könnte, bleibt dabei offen. Es wäre eine Einigung auf der untersten Stufe der Abfallhierarchie, der kleinste gemeinsame Nenner, welcher für eine weltweite Verwertung von Abfällen spricht. Wäre das zu wenig für ein Abkommen? Sicherlich nicht in Anbetracht der vorrangigen Rolle der Deponierung. Ein Deponieverbot brächte das unbestrittene Ziel auf den Punkt, nämlich

dass der Eintrag von Kunststoffen in die Umwelt verhindert werden muss. Der Verlauf der Verhandlungen auf internationaler Ebene hat ergeben, dass die Vermeidung von Kunststoffen nicht im internationalen Interesse liegt. Verstärktes Engagement für gute Verwertungsstrukturen muss die Antwort auf die gescheiterten Verhandlungen sein. Aber auch diese Antwort bleibt aus, solange Abfall keinen positiven Wert hat. Der Schlüssel der Kreislaufwirtschaft liegt in der Wertschöpfung aus dem Rohstoff Abfall. Recyclingtechnologien müssen dies leisten.

Die Diskussion um das Kunststoffrecycling in Europa geht einen deutlichen Schritt weiter. Im Mittelpunkt stehen die Bemessung der Qualität von Recycling und der Vorrang vor energetischer Verwertung. Es geht um Sammelquoten, Recyclingquoten, Verwertungsquoten und schließlich Substitutionsquoten wie etwa Rezyklateinsatzquoten. Auch diese Diskussion hat eine Evolution. Über viele Jahre ging es im Zuge der Verpackungsgesetzgebung um möglichst hohe Sammelquoten. Das Ziel waren flächendeckende Sammelstrukturen. Es wurde, zumindest für Verpackungsabfälle gesprochen, erreicht. Doch genügt diese Betrachtung nicht. Auch Qualität und Quantität der Sammlung und Aufbereitung brauchen eine Bemessung und schließlich muss sich Recycling an der Menge und Verwendbarkeit der Rezyklate messen. Oft wird die Qualität von Rezyklaten unterschätzt und die mangelnde Nachfrage wird zum Hemmschuh der Kreislaufwirtschaft. Der europäische Gesetzgeber hat dies erkannt und gleich mehrere neue Instrumente entwickelt. So beinhalten sowohl die Verpackungsverordnung (EU) 2025/40 als auch der Entwurf der europäischen Altfahrzeugverordnung Rezyklateinsatzquoten für Kunststoffe. Die Quoten sind beiderseits ambitioniert, erfordern Verbesserungen der Recyclingtechnik und ein Umdenken der Hersteller für einen verstärkten Rezyklateinsatz. Die Voraussetzungen sind Kriterien zum Ende der Abfalleigenschaft. Ein Gesetzesentwurf dazu liegt auf europäischer Ebene vor.

### 1.2.2 Erweiterte Herstellerverantwortung

Die erweiterte Herstellerverantwortung ist keine Bedingung für das Recycling, aber eine gute Voraussetzung. Unter der Annahme, dass Hersteller die Lebensdauer, das recyclingfreundliche Design und den Rezyklateinsatz ermöglichen können, nimmt der Gesetzgeber Hersteller bestimmter Produkte in die Pflicht. Abfälle sind per Design zu minimieren und Produkte recyclingfreundlich zu gestalten. Dies schließt die Übernahme von Entsorgungskosten ein. Die wesentlichen Prinzipien, welche die erweiterte Herstellerverantwortung begründen, sind die verursachergerechte Zuordnung der Entsorgungskosten (auch Polluter-Pays-Prinzip genannt), die Verhältnismäßigkeit bei der Zuordnung der Entsorgungskosten und schließlich die Verwertbarkeit der Abfälle. In der Europäischen Union gibt es Herstellerverantwortung für Verpackungen, Elektro- und Elektronikgeräte, Batterien, Fahrzeuge, Textilien sowie Fischfanggeräte. Die Mitgliedstaaten müssen die Umsetzung der Herstellerverantwortung

gewährleisten. Deutschland orientiert sich bei der Abfallgesetzgebung stark an Unionsrecht. Andere Länder Europas nutzen das Instrument der erweiterten Herstellerverantwortung flexibler, etwa auch für Altboote, Altöl, Altreifen, bestimmte Bauprodukte oder auch Matratzen. Hinzu kommen freiwillige Rücknahmesysteme, welche auf der Grundlage von Verträgen oder freiwilligen Selbstverpflichtungen agieren. So organisiert sich mancherorts das Recycling von bestimmten Bauprodukten, Agrarkunststoffen sowie Windeln. Es geht bei der Herstellerverantwortung darum, die öffentlich-rechtlichen Entsorger zu entlasten und werthaltige Abfälle in einem Kreislauf zu führen. Aus volkswirtschaftlicher Sicht ist Recycling sinnvoll, wenn Rezyklate einen positiven Wert haben und als Rohstoff erhalten bleiben.

### 1.2.3 Ende der Abfalleigenschaft

Die Voraussetzung für den Rezyklateinsatz sind Kriterien zum Ende der Abfalleigenschaft. Ein Gesetzesentwurf dazu liegt vor (EU-Kommission 2025). Er sieht Informationspflichten der Recycler vor. Diese bestehen in einer Konformitätserklärung über die Art und Herkunft der Rezyklate und in Hinweisen zur Schadstofffreiheit. Damit ist der Einsatz von Rezyklaten rechtlich legitimiert. Das Abfallrecht tritt zugunsten des Stoff- und Produktrechts in den Hintergrund. Das Ende der Abfalleigenschaft ersetzt weder die Produzentenhaftung noch die Verpflichtungen nach unterschiedlichen Produktgesetzen. Es ist daher gut, dass sich der Vorschlag nicht in den Details unterschiedlicher Anforderungen verstrickt. Er ermöglicht Rezyklateinsatz grundsätzlich und über die Grenzen der Branchen hinweg. Die Eignung für bestimmte Einsatzzwecke muss im Speziellen festgestellt werden. Zu diesem Zweck ist eine Auseinandersetzung mit der jeweiligen Produktgesetzgebung unabdingbar. Der geschlossene Kreislauf ist keine Notwendigkeit. Er ist jedoch ein hilfreicher Betrachtungsrahmen, der Möglichkeiten und Hürden des Recyclings erkennen lässt. Der offene Kreislauf ist nicht frei von Limitationen. Sie sind oft nur anders gelagert und deshalb nicht immer offensichtlich.

Die für das Kunststoffrecycling wesentlichen Produktabfälle sind Verpackungen, Fahrzeuge sowie Elektro- und Elektronikgeräte, Bauprodukte, Agrarkunststoffe und Fanggeräte und schließlich Produktions-, Gewerbe- und Siedlungsabfälle. Die Kriterien zum Ende der Abfalleigenschaft werden für jeden der genannten Abfallströme gelten. Ohne Zweifel werden das Verständnis und die Technologie des Kunststoffrecyclings maßgeblich durch das Verpackungsrecycling bestimmt, gerade auch in der öffentlichen Wahrnehmung. Kunststoffrecycling ist allerdings weitaus mehr, wie die Produktauswahl erahnen lässt. Werkstoffliche Recyclingtechniken entsprechen dem State-of-the-Art und werden trotz chemischer Innovationen auch noch viele Jahre lang die Recyclingwirtschaft bestimmen. Die Kriterien zum Ende der Abfalleigenschaft setzen werkstoffliches Recycling voraus. Das Resultat sind nützliche Hinweise für den Rezyklateinsatz sowie die Stärkung neuer und ressourcensichernder Ge-

schäftsmodelle. Die Kriterien zum Ende der Abfalleigenschaft sind somit auch eine Grundlage für die Fortentwicklung von Förderinstrumenten.

## 1.3 Rezyklate

### 1.3.1 PIR und PCR

Bei der Bewertung der ökologischen Vorteilhaftigkeit des Rezyklateinsatzes wird zumeist in Post-Industrial-Rezyklat (PIR) und Post-Consumer-Rezyklat (PCR) unterschieden. Unter Post-Industrial-Rezyklat versteht man Produktionsabfälle, Angüsse, Grate, Fehlchargen und Material, das zu Abfall wurde, bevor es zu einer Nutzung kam. Dieses Material ist zumeist weder verschmutzt noch vermischt und bietet beste Bedingungen für das Recycling. Die Wiederverwendung kann oft in demselben Unternehmen erfolgen, in welchem der Abfall entstanden ist. Post-Consumer-Rezyklate sind hingegen Kunststoffe, welche von Verbrauchern entsorgt und in Recyclingverfahren aufbereitet wurden. Diese Abfälle sind gealtert, verschmutzt und mit anderen Materialien vermischt. Ihre Aufbereitung erfordert größeren Aufwand. Im Rahmen von Zertifizierungen des Rezyklatanteils stellt die Forderung nach Post-Consumer-Rezyklat sicher, dass es sich tatsächlich um aus Abfall erzeugte Sekundärrohstoffe handelt. Unternehmen sollen nicht dazu verleitet werden, mehr Abfälle als nötig zu generieren. Auch in dem Buch „Understanding Plastic Recycling“ gehen die Autoren auf den Unterschied zwischen PIR und PCR ein (Rudolph et al. 2020). Es ist bekannt, dass die mehrfache Extrusion Kunststoffe leicht verändert. Daher gibt es eine Empfehlung, dass der Anteil von Post-Industrial-Rezyklaten unter 30 Prozent liegen sollte. Damit ist gewährleistet, dass der Anteil von fünfmal verwendetem und dann möglicherweise geschädigtem Kunststoff unter einem Prozent bleibt. In dieser Konzentration bleiben die Schäden unerheblich. Anders ist es, wenn 70 Prozent Rezyklat eingesetzt werden. Dann sind bis zu 5 Prozent fünfmal recyceltes Material in der Mischung, was die Qualität von Neuware beeinflussen könnte. Die Betrachtung bezieht sich auf Post-Industrial-Rezyklate und die Annahme, dass Materialveränderungen in erster Linie durch erneute Verarbeitung, etwa Extrusion oder Spritzguss, hervorgerufen werden. Neue Gesetze wie die Verordnung (EU) 2025/40 sehen Rezyklateinsatzquoten von 30 Prozent von Post-Consumer-Material vor, welches nicht notwendigerweise öfter verarbeitet wurde, aber Alterung durch Gebrauch erfahren haben könnte. Diese Schädigung durch Gebrauch wird in dem Konzept nach dem Gesetz vernachlässigt, was für kurzlebige Verpackung sicherlich eine zutreffende Annahme ist.

### 1.3.2 Rezyklateinsatz

Wohl kaum ein anderes Wort hat die Branche in den vergangenen Jahren mehr bewegt. Nahezu jeder Recycler hat ihn befürwortet, nahezu jeder Hersteller von Kunststoffprodukten hat sich damit beschäftigt. Kein anderes abfallrechtliches Instrument war effektiver. Mit dem unlängst mit Recycling implizierten Rezyklateinsatz wurde durch rechtliche Festschreibung ein neues Handlungsfeld eröffnet. Recycling ist wieder innovativ. Aber warum ist gerade dieses Instrument so erfolgreich? Führt es nicht nur zu aus Müll gemachten Produkten? Wir gehen dem nach und beschreiben, wie der Rezyklateinsatz die abfallrechtliche Produktverantwortung wiederbelebte und wo ungehobene Entwicklungspotenziale liegen.

Im Auftrag der OECD veröffentlichten Brown and Börkey (2024) einen Bericht über Maßnahmen, welche den Einsatz von Rezyklaten steigern. Befürworter solcher Maßnahmen argumentieren, dass sie die Märkte für Sekundärkunststoffe stärken, indem sie erstens eine zusätzliche Nachfrage nach Post-Consumer-Recyclingmaterial (PCR) schafften und zweitens Investitionen zur Verbesserung der Qualität und Quantität des Recyclings förderten. Mehrere Regierungen versuchen derzeit, über Rezyklateinsatzquoten die Recyclingwirtschaft zu stärken. Beispiele sind Zielvorgaben in Form von Quoten oder Modulation der Gebühren im Rahmen der erweiterten Herstellerverantwortung. Auch im öffentlichen Beschaffungswesen werden Produkte mit einem Anteil an PCR-Materialien bevorzugt. Ökobilanzen zeigen recht eindeutig, dass der Einsatz von Rezyklaten vorteilhaft ist, sodass Maßnahmen begründbar sind. Manche Länder gehen sogar so weit, dass sie den Rezyklateinsatz mit Steuervergünstigungen fördern, oder sie verlangen auch Gebühren, wenn Quoten unterschritten werden. Im Mittelpunkt stehen aufgrund der Mengenrelevanz Verpackungen. So gibt es freiwillige Übereinkommen für den Einsatz von Rezyklaten in Verpackungen in Australien, Neuseeland und den Pazifischen Inseln, Kanada, Chile, den Niederlanden, Polen, Portugal, Großbritannien und den USA mit Zielquoten von 25 bis 35 Prozent. Zusätzlich haben einige Länder Zielvorgaben für das Recycling von Getränkeflaschen. Die Rezyklatquoten sind aber keineswegs auf Verpackungen beschränkt. Es gibt Quoten für den Rezyklateinsatz in Teppichen in einigen Bundesstaaten der USA sowie für Textilien und Schuhe in Frankreich und den Niederlanden.

Es steht fest, dass der derzeit noch geringe Rezyklateinsatz ein Innovationspotenzial offenlegt. Recyclingquoten beziehen sich im Wesentlichen auf die Sammlung und Sortierung mit der in Verkehr gebrachten Menge als Referenz. Sie sind und bleiben ohne Zweifel von Wichtigkeit. Rezyklateinsatzquoten verdeutlichen hingegen, wie gut die Abfallaufbereitung gelingt und wofür der gewonnene Sekundärrohstoff taugt. Der geschlossene Kreislauf ist dabei das Ideal. Der Werkstoff wird, was er schon einmal war, oder bleibt, was er ist. Diese fast schon philosophische Erkenntnis ist ein guter Ratgeber, wenn es um die Substitution von Primärrohstoffen geht. So schloss eine Quote in der europäischen Einwegkunststoffrichtlinie den PET-Flaschenkreislauf. Die ge-

setzliche Quote gab einen wichtigen Impuls und lenkte die lebensmittelechten Rezyklate zuverlässig zurück in den Bereich der Getränkeverpackungen. Die Zielquote von 30 Prozent im Jahr 2030 wurde bereits 2025 erreicht. Es gab offenbar kein technisches Hindernis, sondern ein organisatorisches. Regulatorik löste es. Die Deutsche Gesellschaft für Abfallwirtschaft (DGAW) befürwortet ebenfalls Rezyklateinsatzquoten als Instrument und schlug sogar vor, Recyclingquoten perspektivisch als Bemessungsinstrument aufzugeben (Gosten et al. (2025)).

### 1.3.3 Zertifizierungen

TÜV, DIN CERTCO und Flustix bieten Zertifizierungen des Rezyklatgehalts in Kunststoffprodukten und berufen sich dabei auf die folgenden Normen (DIN CERTCO 2026):

- DIN EN ISO 14021:2021-10 Umweltkennzeichnungen und -deklarationen – Umweltbezogene Anbietererklärungen (Umweltkennzeichnung Typ II)
- DIN EN 15343:2008-02 Kunststoffe – Kunststoff-Rezyklate – Rückverfolgbarkeit bei der Kunststoffverwertung und Bewertung der Konformität und des Rezyklatgehalts
- DIN EN 45557:2020-09 Allgemeines Verfahren zur Bewertung des Anteils an recyceltem Material von energieverbrauchsrelevanten Produkten

Die Zertifizierung ist denkbar schlicht. Ausgewiesen wird der Massenanteil des Rezyklats am Gesamtprodukt. Die Zertifizierung bezieht sich auf Kunststoffprodukte in Allgemeinen. Mit der DIN EN 45557:2020 ist zudem eine Norm vorhanden, die auf den Rezyklatanteil in elektrischen Geräten spezialisiert ist. Bei entsprechenden Produkten ist diese Norm maßgebend. Seit einiger Zeit bieten Zertifizierer auch die Zertifizierung von Verpackung an. Dazu wird aber eine andere Kennzeichnung verwendet, die Verwechslungen mit Produkteigenschaften ausschließt. Diese Kennzeichnung ist in ihrer Bedeutung allerdings keinesfalls zu unterschätzen, denn mit der neuen europäischen Verpackungsverordnung (EU) 2025/40 und der zu erwartenden europäischen Altfahrzeugverordnung werden Rezyklatanteile verbindlich.

Das Umweltzeichen „Blauer Engel“ berücksichtigt ebenfalls Produkte aus rezykliertem Kunststoff. Maßgeblich sind die Vergabekriterien „Produkte aus Recycling-Kunststoffen DE-UZ 30a“ (RAL gGmbH 2026). Auch hierin sind die genannten Normen maßgebend. Zugleich wirbt das Gütezeichen für die ausgezeichneten Produkte auf einer Internetseite. Die Produktpalette reicht von Stiften und Büromaterial über Abfallbeutel, Abdeckfolien, Profile, Rohre, Boxen, Tragetaschen, Versandbeutel, Abfalltonnen, Faltboxen, Gießkannen, Rasensteine, Eimer und Kübel, Hundekotbeutel, Körbe, Wannen, Blumentöpfe, Besen, Bürsten, Haushaltsartikel bis hin zu Spielplatzgeräten. Die Vergabekriterien „Computer, Tastaturen und Mäuse, DE-UZ 78“ sehen vor, dass entsprechende Elektronikgeräte PCR-Anteile von mindestens 10 bis 35 Prozent aufweisen müssen (Bild 1.5).

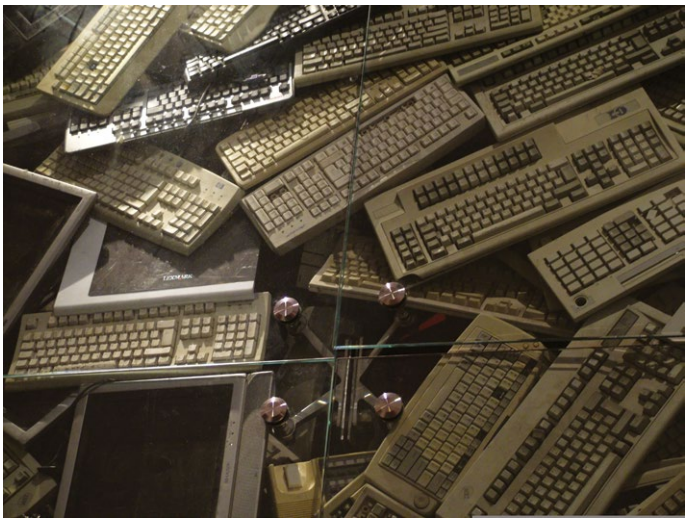


**Bild 1.5** Tastaturen bestehen oft aus rezyklierten Kunststoffen, Bild von Jorge Carlos auf Pixabay

Das Institut für Bauen und Umwelt e. V. (IBU) bietet seit dem Jahr 2025 die Zertifizierung „Recycled Content Declaration“. Sie bietet Herstellern von Baustoffen die Möglichkeit, den Rezyklatanteil in ihrem Produkt auszuweisen. Das Schema ist materialunabhängig anzuwenden. Bislang erhielten nur die Produkte des Stahlherstellers Voestalpine Stahl Donawitz GmbH die Auszeichnung (IBU 2025). Das IBU e. V. stützt sich bei der Zertifizierung ebenfalls auf genannte Normen und zudem wohl auch auf die folgende Norm:

- ISO 59020:2024 Circular economy – Measuring and assessing circularity performance

In Kapitel 6 dieses Buches wird deutlich werden, warum diese Zertifizierung richtunggebend im Kontext der europäischen Normung unter der Bauprodukteverordnung (EU) 2024/3110 sein könnte.

## 1.4 Bemessung von Zirkularität

### 1.4.1 Recyclingfähigkeit

Recyclingfähigkeit bezieht sich zumeist auf das Verpackungsrecycling. Sie beschreibt die Möglichkeit unter den gegebenen Voraussetzungen, aber nicht das abgeschlossene Recycling. Was ist nun Recyclingfähigkeit und warum brauchen wir diese Betrachtung? Dazu beschrieb Pomberger (2020), dass es eine theoretische Recyclingfä-

higkeit, eine technische Recyclingfähigkeit und eine reale Recyclingfähigkeit gibt. Dabei geht es zunächst um die Materialität eines Produkts, welches zu Abfall werden könnte. Ist das Material für eine Aufarbeitung geeignet? Handelt es sich um Verbunde? Hat die Nutzung Qualitätsverluste wie Alterung oder Verschmutzung hinterlassen? Technische Recyclingfähigkeit bezieht sich hingegen auf den recyclingtechnischen Prozess. Gibt es Sortier- und Aufbereitungsanlagen für diesen Abfall? Werden die Abfälle darin hochwertig aufbereitet? Gibt es Aufbereitungsstandards? Reale Recyclingfähigkeit bezieht sich eher auf organisatorische Fragen. Gibt es ein Sammelsystem oder Strukturen, welche Abfälle dem Verwertungsverfahren zuführen? Sind diese Strukturen belastbar, flächendeckend und in zeitlich angemessenen Abständen verfügbar? Gibt es angemessene Akzeptanz für das Konzept? Erst wenn alle drei Bedingungen zugleich erfüllt sind, kann ein Gegenstand als recyclingfähig bezeichnet werden. Damit ist Recyclingfähigkeit nicht nur eine Frage des Produktdesigns, sondern auch der Recyclingtechnik. Ist ein Gegenstand nicht recyclingfähig, dann kann es ein Designfehler sein, es kann aber auch auf fehlende Recyclingverfahren oder schlechte Sammlung hindeuten. Ebenso ist eine Aussage wie „PP ist hoch recyclingfähig!“ unsinnig. Unter der Annahme der europäischen Strukturen für die Verpackungsabfallsammlung sind starre Verpackungen aus reinem PP recyclingfähig. Stoffgleiches PP im Verbund eines Fahrzeugteils, als Dübel im Bauwesen oder auch als Ballengarn in der Landwirtschaft ist nicht recyclingfähig und scheitert oft an Erfassungssystemen oder auch an Recyclingverfahren. Recyclingfähigkeit muss für jeden Abfallstrom neu diskutiert werden und immer wieder stellen sich die Fragen nach den Erfassungsstrukturen, den verfügbaren Recyclingverfahren und in diesem Kontext der Beschaffenheit des Gegenstandes.

Pomberger (2020) führt neben der Recyclingfähigkeit eine zweidimensionale Material-Nutzungszeit ein. Sie beschreibt einerseits die Lebensdauer eines Gegenstandes und andererseits die Anzahl an Recyclingkreisläufen, welche ein Material durchlaufen kann. Beide Eigenschaften sollten möglichst hoch sein. Lange Lebensdauern sind zu befürworten, denn sie vermeiden Abfälle. So mag ein Kunststoff in einer Verpackung angesichts der vorhandenen Recyclingstrukturen recyclingfähig sein, während es derselbe Kunststoff in einem Bauprodukt nicht ist. Doch ist der Baustoff mit einer Lebensdauer von vielleicht 10 Jahren langlebig, im Gegensatz zu einer Verpackung mit einer Lebensdauer von einem halben Jahr. Die Verpackung müsste 20-mal ein Recycling durchlaufen, um dieselbe Material-Nutzungszeit wie der Baustoff zu erreichen. Die Verpackung wird das Ziel nicht erreichen, denn die Recyclingquote liegt nur bei rund 50 Prozent. Aus diesem Grund darf Nachhaltigkeit nicht auf Recyclingfähigkeit reduziert werden.

Die Bemessung der Recyclingfähigkeit hat insofern eine hohe Bedeutung erlangt, als sie die Grundlage für die Beteiligungsentgeltgestaltung bietet. Das Konzept der Ökomodulation wurde im Kontext des Verpackungsrecyclings entwickelt. Für andere Materialkreisläufe hat die Bemessung der Recyclingfähigkeit eine eher theoretische Bedeutung.

### 1.4.2 Quoten

Im Allgemeinen wird Zirkularität durch Quoten bemessen. Die Art der Berechnung ist naturgemäß umstritten, denn es handelt sich um ein einfaches Instrument für einen komplexen Sachverhalt. Dennoch haben Quoten Lenkungswirkung. Hense et al. (2024) betrachteten die Möglichkeiten der Quotensetzung kritisch und doch befürwortend. Sie wurden als Sammelquoten eingeführt, um sicherzustellen, dass möglichst viele Abfälle erfasst werden. Sie entfalten aber nicht immer die nötige Wirkung auf eine hochwertige Verwertung. Quoten sind in Gesetzen festgeschrieben und damit Maß und Anforderung an eine abfallwirtschaftliche Leistung. Gerade diese Leistung gilt es zu definieren. So gibt es erstens die rein massebezogenen Sammel-, Verwertungs- und Recyclingquoten, welche sich auf das gesamte Aufkommen eines Materialstroms beziehen. Der Anteil einer Marktmenge, die einem Sammelsystem zugeführt wird, ist die Sammelquote. Die Anteile der stofflichen oder energetischen Verwertung sind Verwertungsquoten bzw. Recyclingquoten im Fall des Recyclings. Die zweite Form der Quote sind material- bzw. elementspezifische Recyclingquoten. Diese tauchen beispielsweise in der Batterieverordnung (2023/1542/EU) auf. So müssen ab 2027 auch 50 Prozent des in Lithium-Ionen-Batterien enthaltenen Lithiums (80 Prozent ab 2031) sowie 90 Prozent von Kobalt, Kupfer, Blei und Nickel (95 Prozent ab 2031) zurückgewonnen werden. Die dritte Form der Quote sind Rezyklat- und Substitutionsquoten. Sie beziehen sich auf den Einsatz von Sekundärrohstoffen in marktfähigen Produkten. Diese drei Arten definieren unterschiedliche Ziele. Erstens geht es um die vollständige Erfassung von Abfällen, zweitens geht es um eine recyclingtechnische Priorisierung und drittens um die Verwendung von Sekundärrohstoffen. Die steigende Anzahl von Quoten bedeutet aber auch einen höheren Verwaltungs- und Prüfaufwand. Insgesamt befürworten Hense et al. (2024) Quoten. Sie mahnen aber zu einem bedachten Umgang. Vor allem darf es bei der Vielzahl von Quoten nicht zu Verwechslungen und unangemessenen Vergleichen kommen. Quoten müssen ein ambitioniertes und zweckmäßiges Steuerungsinstrument sein. Sie müssen festlegen, wohin sich die Branche entwickeln muss. Während die Sammelquoten bereits hoch sind und auch recht zuverlässig erfüllt werden, sind Rezyklateinsatzquoten neu und fordern nicht nur die Abfallsammlung, sondern auch die Aufarbeitung zu einem nutzbaren Rohstoff.

### 1.4.3 Maße für Zirkularität

Huysman et al. (2017) wählten die Methode der kumulativen Exergieextraktion aus der natürlichen Umwelt (CEENE) zur Bewertung der Kreislaufführung von Kunststoffen. Die Methode ist eine Fortentwicklung des Recycling-Nutzen-Index (RBR), der von der Gemeinsamen Forschungsstelle (JRC) der Europäischen Kommission entwickelt wurde und auf einer Ökobilanz basiert. Der Index ist definiert als das Verhältnis des

ökologischen Nutzens, der durch das Recycling eines Produkts erzielt werden kann, zu den Umweltbelastungen, die mit der Produktion aus Primärrohstoffen und der anschließenden Entsorgung verbunden sind (Fulvio und Mathieux 2012, Ardente und Mathieux 2014). Huysman et al. (2017) argumentieren, dass Ökobilanzen berücksichtigen sollten, dass sich die Qualität von Kunststoffen mit jedem Recycling leicht verschlechtert. Substitution gelingt auf qualitativer Ebene nicht gleichwertig. Entsprechende Annahmen und Recyclinggutschriften in Ökobilanzen seien demnach zu optimistisch. Huysman et al. (2017) schlagen zur Korrektur den Circular Economy Performance Indicator (CPI) vor. Dieser ist definiert als das Verhältnis des tatsächlich erzielten Umweltnutzens (d. h. der angewandten Abfallbehandlungsoption) zum idealen Umweltnutzen gemäß der Qualität dieses Abfallstroms. Wie beim RBR-Indikator sind Ökobilanzen die Grundlage. Oft konzentrieren sich Ökobilanzen auf Emissionen. Das sei für das Recycling nicht zweckmäßig, argumentieren Huysman et al. (2017), weshalb die CEENE-Methode (Cumulative Exergy Extraction from the Natural Environment) betrachtet wird. Die Autoren unterstellen vier Nutzungsszenarien für Rezyklate. Erstens die Nutzung in demselben Produkt, was dem geschlossenen Materialkreislauf entspricht. Zweitens die teilweise Nutzung in demselben Produkt unter Zumischung von Neuware. Das dritte Qualitätsszenario bezieht sich auf die Nutzung in einem anderen Produkt und die vierte Option entspricht der Verbrennung. Die Autoren führen in einer Rechnung Faktoren ein, die den Rezyklatanteil in einem Produkt widerspiegeln. Handelt es sich um das gleiche Produkt, wie etwa bei einem Flasche-zu-Flasche-Recycling, dann kann der Faktor mit 1 angenommen werden. Wenn die Flasche nach dem Recycling aber nur 30 Prozent Rezyklat beinhaltet, dann ist der zu berücksichtigende Faktor 0,3. Wenn in einem offenen Kreislauf eine Flasche zu einem Pullover recycelt wird, dann ist die Ökobilanz von Flaschen unerheblich und die Bilanz der Pulloverherstellung ist maßgebend, unter Berücksichtigung des Rezyklatanteils im Pullover. Bei der Verbrennung ist eine C- bzw. $CO_2$-Bilanz zu führen. Ob nun geschlossener und offener Kreislauf gleichwertig sind, kann erst mit einer vergleichenden Ökobilanz beider Möglichkeiten festgestellt werden. Die Antwort auf die Frage der Recyclingeffizienz ist also recht aufwendig. Aus diesem Grund ist es sinnvoll, auch die gesetzliche Substitutionsanforderung durch den Einsatz von Rezyklaten verursachergerecht zuzuordnen. Diese Auffassung spricht stark für die Rezyklateinsatzquoten Verpackungen und Fahrzeuge betreffend.

# 1.5 Ökonomie und Ökologie des Recyclings

## 1.5.1 Ökonomie des Recyclings

Recycling ist volkswirtschaftlich sinnvoll, da Rohstoffe erhalten bleiben. Das Ziel der Circular Economy ist es, das Wirtschaftswachstum vom Rohstoffverbrauch zu entkoppeln. So klar diese Zielstellung ist, so eng sind die Möglichkeiten, Kunststoffe durch rezyklierte Kunststoffe zu ersetzen. Die Voraussetzung sind ein positiver Marktwert der Rezyklate und das Vorhandensein von Verfahren, welche dorthin führen. Zunächst verursacht Abfallbehandlung Kosten. Instrumente wie die erweiterte Herstellerverantwortung wurden entwickelt, um Kosten zu minimieren oder mindestens den Verursachern zuzuordnen. Oft stellt sich die Frage, wann sich Abfallverwertung lohnt. Diese Frage ist aber nicht entscheidend. Abfallverwertung ist in jedem Fall eine Notwendigkeit, da sie die Umwelt und die natürlichen Lebensgrundlagen wie Wasser, Böden und Luft schützt. Abfallwirtschaft ist Daseinsvorsorge. In zweiter Linie ist sie Wertschöpfung im Sinne einer hochwertigen Verwertung. Idealerweise soll Abfall wertoptimiert zurückgewonnen werden und das Verhältnis von Aufwand und Nutzen ausgewogen sein. Die kostengünstigste Form der Abfallverwertung ist die Wiederverwendung als Weitergabe oder als Verkauf auf dem Second-Hand-Markt. Auch das Recycling ist zumeist kostengünstiger als die energetische Verwertung. Ein Grund dafür liegt in der $CO_2$-Bepreisung, ein anderer in der Wertigkeit der Rezyklate im Gegensatz zur zurückgewonnenen Energie (Faber und Gradus 2025, Gradus et al. 2017).

Ergänzend zu den Regeln des Marktes gibt es ökonomische Steuerungsinstrumente, welche Abfälle in das Recycling lenken. Zu nennen ist die Kunststoffsteuer, welche die Europäische Union erhebt. Die Grundlage dafür ist der am 14.12.2020 erlassene Eigenmittelbeschluss (EU) 2020/2053 des europäischen Rates, in dem die Eigenmittel der Union zur Finanzierung des EU-Haushaltes festgelegt werden. Darin wird auf die damals gültige Verpackungsrichtlinie 94/62/EG verwiesen und für jede nicht entsprechend der Richtlinie verwertete Tonne Kunststoff eine Steuer erhoben. Die Abgabe beträgt 0,80 Euro pro Kilogramm der im jeweiligen Mitgliedstaat angefallenen, nicht recycelten Verpackungsabfälle aus Kunststoff. Im Jahr 2021 überwies Deutschland ca. 1,3 Mrd. Euro zu diesem Zweck. Am 4.1.2024 gab die Bundesregierung bekannt, dass die Plastikabgabe ab dem 1.1.2025 von den Herstellern und Importeuren von Plastikprodukten gezahlt werden muss (hesselmann service GmbH 2024). Im März 2026 war dieses Vorhaben aber noch nicht umgesetzt. Diese Steuern beziehen sich ausschließlich auf Verpackungskunststoffe. Kunststoffabfälle aus anderen Produkten werden hierbei nicht berücksichtigt. Das Ziel der Maßnahme liegt weniger in der Finanzierung des EU-Haushalts als in der Lenkung von Verpackungsabfällen in das vorgesehene Recycling. Zwischenzeitlich kündigte die Europäische Kommission eine ähnliche Abgabe für nicht rezyklierte Elektro- und Elektronikgeräte an, setzte die Maßnahme aber noch nicht um. Weiterhin erheben einige Städte und Gemeinden wie