



Mathias Seitz, Beate Langer, Uwe Sauermann, Markus Klätte

Rezyklateinsatz in Kunststoffverpackungen: Techniktrends und Entwicklungspotenziale



*Mathias Seitz, Beate Langer,
Uwe Sauermann, Markus Klätte*
Rezyklateinsatz in Kunststoffverpackungen:
Techniktrends und Entwicklungspotenziale



Steinbeis-Edition

Autoren

Prof. Dr.-Ing. Mathias Seitz (Hochschule Merseburg)

Prof. Dr. Beate Langer (Hochschule Merseburg)

Dr. Uwe Sauermann (Steinbeis-Transferzentrum Ressourcen-Technologie und Management)

Markus Klätte (Steinbeis-Transferzentrum Ressourcen-Technologie und Management)



**Steinbeis-Transferzentrum
Ressourcen-Technologie
und Management**

**Mathias Seitz, Beate Langer,
Uwe Sauermann, Markus Klätte**

Rezyklateinsatz in Kunststoff- verpackungen: Techniktrends und Entwicklungspotenziale

Schriftenreihe Ressourcen-Technologie und Management

Steinbeis-Transferzentrum Ressourcen-Technologie und Management (Hrsg.)

Nutzungsvorbehalt nach § 44b Satz 3 UrhG:

Die Steinbeis-Stiftung für Wirtschaftsförderung behält sich eine Nutzung ihrer Inhalte für kommerzielles Text- und Data-Mining im Sinne von § 44b UrhG ausdrücklich vor. Für den Erwerb einer entsprechenden Nutzungslizenz wenden Sie sich bitte an die Steinbeis-Stiftung für Wirtschaftsförderung.

Hinweis im Sinne des Gleichbehandlungsgesetzes:

Aus Gründen der leichteren Lesbarkeit wird auf eine geschlechtsspezifische Differenzierung verzichtet. Entsprechende Begriffe gelten im Sinne des Gleichbehandlungsgesetzes für alle Geschlechter.

Hersteller im Sinne der Produktsicherheitsverordnung (GPSR):

Steinbeis-Stiftung für Wirtschaftsförderung | Steinbeis-Edition,
Adornostraße 8, 70599 Stuttgart, DE | edition@steinbeis.de

Impressum

© 2026 Steinbeis-Edition

Alle Rechte der Verbreitung, auch durch Film, Funk und Fernsehen, fotomechanische Wiedergabe, Tonträger jeder Art, auszugsweisen Nachdruck oder Einspeicherung und Rückgewinnung in Datenverarbeitungsanlagen aller Art, sind vorbehalten.

Schriftenreihe Ressourcen-Technologie und Management
Steinbeis-Transferzentrum Ressourcen-Technologie und Management (Hrsg.)

Mathias Seitz, Beate Langer, Uwe Sauermann, Markus Klätte
Rezyklateinsatz in Kunststoffverpackungen: Technikrends und Entwicklungspotenziale

1. Auflage, 2026 | Steinbeis-Edition, Stuttgart
ISBN 978-3-95663-269-3

Satz: Steinbeis-Edition

Titelbild: [monticello/shutterstock.com](https://www.shutterstock.com), bearbeitet von Steinbeis-Edition

Verlag: Steinbeis-Edition | Steinbeis-Stiftung, Adornostr. 8, 70599 Stuttgart

Steinbeis ist mit seiner Plattform ein verlässlicher Partner für Unternehmensgründungen und Projekte. Wir unterstützen Menschen und Organisationen aus dem akademischen und wirtschaftlichen Umfeld, die ihr Know-how durch konkrete Projekte in Forschung, Entwicklung, Beratung und Qualifizierung unternehmerisch und praxisnah zur Anwendung bringen wollen. Über unsere Plattform wurden bereits über 2.500 Unternehmen gegründet. Entstanden ist ein Verbund aus 4.500 Expertinnen und Experten in rund 1.000 Unternehmen, die jährlich mit mehr als 10.000 Kunden Projekte durchführen. So werden Unternehmen und Mitarbeitende professionell in der Kompetenzbildung und damit für den Erfolg im Wettbewerb unterstützt. Die Steinbeis-Edition verlegt ausgewählte Themen aus dem Steinbeis-Verbund.

228260-2026-01 | www.steinbeis-edition.de | edition@steinbeis.de

Danksagung

Diese Studie entstand als eine Zuarbeit für das *Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB)* im Jahr 2022. Die Gesamtstudie des TAB erschien unter dem Namen *„Strategien und Instrumente zur Verbesserung des Rezyklateinsatzes. Mit Fallstudien zu Kunststoffverpackungen, Elektrogeräten sowie Baustoffen. Endbericht zum TA-Projekt“* (DOI: 10.5445/IR/1000168838). Wir danken herzlich für die Freigabe des Deutschen Bundestages, diese Zuarbeit nun als eigenständige Studie veröffentlichen zu dürfen.

Bei der Arbeit an der Studie wurden die Autoren von vielen Mitstreitern unterstützt. Zu nennen sind hierbei vor allem die Praxispartner aus der Abfallwirtschaft und Rezyklathersteller. So hat z.B. die *ALPLA Group* eigene Untersuchungen und aufwändige LCA-Analysen sowie Positionspapiere zu relevanten rechtlichen und ökonomischen Rahmenbedingungen des Kunststoffrecyclings in Europa zur Verfügung gestellt und sich bei der Qualifizierung der Branchenumfrage eingebracht. Fachliche Unterstützung erhielten wir weiterhin vom *BUND e. V.*, vom *bvse e. V.* und von der *IK Industrievereinigung Kunststoffverpackung e. V.* Dank auch an alle Personen, Firmen und Institutionen, die sich an unserer Branchenumfrage beteiligt haben (siehe Anlage 2 der Studie). Ohne diesen Input wäre die Studie sicherlich etwas akademischer ausgefallen.

Dr. Christoph Kehl und Dr. Pauline Rioussset vom TAB haben – quasi durch die Brille der Abgeordneten schauend – uns nicht nur im Hinblick auf das Studiendesign sowie Formfragen gefordert, sondern auch geduldig in den vielen inhaltlichen Details eines solchen Vorhabens bis zur finalen Fassung begleitet. Dem gilt unser besonderer Dank, verbunden mit der Hochachtung für die von ihnen erarbeitete Verarbeitung der Studienergebnisse.

Wir bedanken uns ebenso herzlich bei Marina Tyurmina und Eva Gast von der Steinbeis-Edition, die Gestaltung und Layout verantworteten und uns wie immer zuverlässig und zugleich kompromissbereit den Rücken freigehalten haben.

Die Autoren, November 2025

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	9
Tabellenverzeichnis	11
Abkürzungsverzeichnis.....	12
1 Zusammenfassung.....	15
2 Problemstellung und Ziele.....	20
3 Studiendesign	23
4 Stand der Wiederverwertung von Abfällen aus Kunststoff- verpackungen	25
4.1 Grundlegende Rahmenbedingungen	25
4.1.1 Werkstoffliche Rahmenbedingungen	25
4.1.2 Recyclingbedingte Rahmenbedingungen hinsichtlich Kunststoffsammlung, -sortierung und -verwertung.....	34
4.1.3 Grundlegende rechtliche Rahmenbedingungen	45
4.2 Beschreibung der Recyclingpfade	66
4.2.1 Einsatzfelder und -mengen von Rezyklaten aus dem mechanischen Recycling.....	66
4.2.2 Effizienz der unterschiedlichen Sammelsysteme	72
4.2.3 Kunststoffabfallaufbereitung und Recycling.....	84
4.3 Bewertung von Recyclingpfaden – was macht wann Sinn?.....	100
4.3.1 TRL – Die Technologiereife.....	100
4.3.2 Lebenszyklusanalyse (LCA).....	105
4.3.3 Wirtschaftliche Bewertung	111
4.4 Allgemeine Hemmnisse für die Wiederverwertung von Kunststoffen.....	116
4.4.1 Hemmnis Recyclingfähigkeit	119
4.4.2 Hemmnisse bei den rechtlichen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen	133
5 Potenziale der Wiederverwertung von Abfällen aus Kunststoff- verpackungen steigern	151
5.1 Analyse des Steigerungspotenzials	151
5.2 Potenziale bei höheren Toleranzen gegenüber Fremd- und Störstoffen	159

5.3	Potenziale bei gesetzlichen Regelungen und Steuerungs- instrumenten.....	164
5.4	Potenziale der KI und Digitalisierung.....	169
5.4.1	Erkennung/Sortierung.....	169
5.4.2	Verknüpfung von Daten zu Geschäftsmodellen	174
5.5	Verbesserung der Qualitäten von Rezyklaten	175
5.6	Forschungsprojekte	178
5.6.1	Werkstoffliches Recycling.....	179
5.6.2	Verbesserung der Rezyklatqualität.....	182
5.6.3	Chemisches Recycling.....	184
5.7	Kunststoffrecycling von Biopolymeren.....	186
6	Beschreibung möglicher Zielsetzungen	192
6.1	Zusammenfassung Ergebnisse.....	192
6.2	Zielkonflikte.....	193
6.3	Bewertung der Zielkonflikte.....	200
7	Perspektiven und Handlungsoptionen.....	205
7.1	Perspektiven.....	206
7.1.1	Perspektive 1: Status quo beibehalten.....	207
7.1.2	Perspektive 2: Stark reglementierte Kunststoffkreisläufe.....	208
7.1.3	Perspektive 3: Wertorientierte Sammlung und Verwertung ...	209
7.2	Instrumente.....	212
	Literatur.....	216
	Anhang	240

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1:	Studiendesign.....	24
Abb. 2:	Zusammensetzung von Kunststoffen als Grundwerkstoffe: Möglichkeiten der Additivierung.....	28
Abb. 3:	Schematische Darstellung der molekularen Struktur von Polyethylen	29
Abb. 4:	Änderungen des MFI in Abhängigkeit von der Zyklenzahl im Extrusionsprozess (links) bzw. Spritzguss (rechts).....	30
Abb. 5:	Polymerzusammensetzung und Rückstandsgehalt (Residue) der verschiedenen Abfallkategorien: Deckel, (Cap), Etikett (Label), Flasche (Bottle), Abdeckmaterial (Lidding), Schale (Tray) und Folie (Film)	31
Abb. 6:	REM-Aufnahmen einer Multilayer Verpackungsfolien (Peelfolie).....	32
Abb. 7:	Zusammensetzungen von Kunststoffverpackungen	33
Abb. 8:	Vereinfachter Stoffkreislauf für Kunststoffe	35
Abb. 9:	Zusammensetzung DSD-Leichtverpackungen (LVP)	39
Abb. 10:	Stoffströme aus der Verwertung von LVP	40
Abb. 11:	Steigerung der Rezyklatausbeute im PVC-Bereich nach Anwendungen in der EU	41
Abb. 12:	Nachfrage nach Kunststoffwerkstoffen in 2019	67
Abb. 13:	Entwicklung der Verwertung der Kunststoffabfälle.....	75
Abb. 14:	Sammelsysteme: Systemkosten bezogen auf die Rezyklatausbeute	77
Abb. 15:	Trend zu Verpackungspfandsystemen in Europa.....	81
Abb. 16:	Teilnehmerländer der EU am System Grüner Punkt.....	83
Abb. 17:	Schematische Darstellung der LVP-Sortierung	86
Abb. 18:	Vereinfachtes Verfahrensschema des PP- und PE-Recyclings.....	87
Abb. 19:	Chemische Recyclingverfahren im Überblick.....	94
Abb. 20:	Anwendungseignung verschiedener Polymer-Rezyklate	122
Abb. 21:	Exemplarischer Zielkonflikt zwischen Rezyklierbarkeit	124
Abb. 22:	Zielkonflikt bei der Gestaltung ökologischer Verpackungen.....	125
Abb. 23:	Relevanz von Verpackungen	127
Abb. 24:	Bewertungsmatrix für Recyclingfähigkeit nach Christiani.....	130
Abb. 25:	Preisentwicklung – Vergleich rPET, PET-Flakes und virgin PET	140

Abb. 26: Mictrom-Schnitte von Multilayer-Folien in polarisiertem Licht...	150
Abb. 27: Einordnung der unterschiedlichen Verwertungsarten in einer Circular Economy unter Berücksichtigung der Qualität und der Anwendungsbreite	155
Abb. 28: Zusammensetzung der Verpackung nach Lebensmittelgruppen..	158
Abb. 29: Prozesskette des PET-Recycling für Food-Anwendungen	160
Abb. 30: Recycling-Pyramide gem. § 6 KrWG	163
Abb. 31: Einfluss der Konzentration von Aufklebern aus Papier und zwei verschiedenen PP-Folien in Rezyklaten auf die Kerbschlagzähigkeit der Rezyklate	178
Abb. 32: Neues Stabilisatorsystem übertrifft Neuware und kommerzielle Rezyklatstabilisatoren.....	182
Abb. 33: Neues Stabilisatorsystem bietet exzellente Langzeit-Thermostabilität von Rezyklaten	183
Abb. 34: Bio-Polymerwerkstoffe auf der Basis nachwachsender Rohstoffe oder biologisch abbaubar gemäß EN 13432	187
Abb. 35: End-of-Life-Routen für biologisch abbaubare und nicht biologisch abbaubare Biokunststoffabfälle	188
Abb. 36: Etiketten für biobasierte Polymere	189
Abb. 37: Stoffkreislauf mit biologisch abbaubaren Produkten auf Basis nachwachsender Rohstoffe.....	190
Abb. 38: PET-Recycling.....	199
Abb. 39: Drei Perspektiven der Verbesserung des Kunststoffrecyclings	206
Abb. 40: Zeitliche Schiene zu einer möglichen Umsetzung.....	215

Tabellenverzeichnis

Tab. 1:	Möglichkeiten und Eigenschaften durch Zusatzstoffe	28
Tab. 2:	Menge der gesammelten Verpackungen aufgeschlüsselt nach Jahr und Sammelsystemen	37
Tab. 3:	Zusammensetzung der Abfallfraktionen inkl. der Shredder- leichtfraktion (SLF) nach Kunststoffsorten	38
Tab. 4:	Die Ausbeuten einzelner Kunststofffraktionen aus der LVP-Sortierung.....	39
Tab. 5:	Werkstoffliche Verwertung von Verpackungsabfällen in Abhängigkeit vom Sammelsystem. Darstellung UBA.....	41
Tab. 6:	Eigenschaftsvergleich von rPET mit technischen Kunststoffen (grün für amorphe und blau für teilkristalline Kunststoffe).....	43
Tab. 7:	Beispielhafter Vergleich Virgin-Material und Rezyklat PP.....	44
Tab. 8:	Menge der verarbeiteten Kunststoffwerkstoffe nach relevanten Branchen 2019.....	68
Tab. 9:	Anwendungen von Rezyklaten in einzelnen Branchen sowie zugeordnete Produktbeispiele	69
Tab. 10:	Einsatz von Rezyklaten im Verpackungs- und Nichtverpackungsbereich	70
Tab. 11:	Hol- und Bringsysteme	74
Tab. 12:	Beispiel Rücklaufquoten Deutschland 2019.....	76
Tab. 13:	Vergleich der CO ₂ -Bilanzen in verschiedenen Sammelsystemen....	79
Tab. 14:	TRL.....	102
Tab. 15:	TRL chemischer Recyclingverfahren nach BKV	103
Tab. 16:	CO ₂ -Äquivalente und KEA in Abhängigkeit der Sortier- ausbeute und dem Einfluss des chemischen Recyclings	107
Tab. 17:	Auswertungsbeispiel	131
Tab. 18:	Beispiel qualitative Bewertung, Bewertungspfad	132
Tab. 19:	Hemmnisse für den Rezyklateinsatz	149
Tab. 20:	Übersicht über die Eigenschaften von IDs	173
Tab. 21:	Maßnahmen zur Rezyklatverbesserung.....	176
Tab. 22:	Zusammenfassung ausgewählter Ergebnisse.....	192
Tab. 23:	Potenzial der Veränderung zur Schließung von Stoffkreis- läufen in Deutschland (Perspektive 3).....	211
Tab. 24:	Instrumente zur Umsetzung der Perspektiven	213

Abkürzungsverzeichnis

ABS	Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymer
AfA	Absetzung für Abschreibung
AGVU	Arbeitsgemeinschaft Verpackung + Umwelt e. V.
ASN	Abfallschlüsselnummer
Auto-ID	Automatische Identifikation und Datenerfassung
BASF	Badische Anilin- & Sodafabrik SE (Bremerhaven)
BDE	Bundesverband der Deutschen Entsorgungswirtschaft e. V.
BEHG	Brennstoffemissionshandelsgesetz
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BMU	Bundesministerium für Umwelt (bis 2021)
BMUV	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (ab 2022)
C2C	Cradle to Cradle; Kreislaufwirtschaftsprinzip
CEFIC	Conseil Européen des Fédérations de l'Industrie Chimique (Wirtschaftsverband der europäischen chemischen Industrie)
CfK	Carborfaserverstärkte Kunststoffe
CHNSO	Organische Elementaranalyse (für die 5 genannten Elemente)
CIC	Combustion Ion-Chromatography
CLP	Classification, Labelling and Packaging
D4R	Design for Recycling
DIN	Deutsche Industrienorm
DLT	Distributed-Ledger-Technologie
DPP	Digitaler Produktpass
DSC	dynamische Differenzkalorimetrie (DDK, engl. DSC)
DSD	Duales System Deutschland (auch als Mehrzahl möglich)
EAN	Europäische Artikel-Nummer
EBS	Ersatzbrennstoff
ECHA	European Chemical Agency
ESFA	European Food Safety Authority
EU	Europäische Union
FT-IR	Fourier-Transform-Infrarotspektroskopie
FuE	Forschung und Entwicklung
GfK	Glasfaserverstärkte Kunststoffe
GKV	Gesamtverband Kunststoffverarbeitende Industrie e. V.
GVK	Getränkeverbundkarton
GVM	Gesellschaft für Verpackungsmarktforschung mbH
GWP	Global Warming Potenzial
GÜ	Generalübernehmer
HBCD	Hexabromcyclododecan (häufiger Flammschutzhemmer in KS)
HDPE	High Density Polyethylene
HIPS	High Impact Polystyrene
IBC	Industrial Bulk Container

ICP-OES	Inductively Coupled Plasma- Optical Emission Spectrometry
ID	identification
IK	Industrievereinigung Kunststoffverpackungen e. V.
ISO	International Organization for Standardization
KEA	kumulierter Energieaufwand
KI	Künstliche Intelligenz
KrWG	Kreislaufwirtschaftsgesetz
KS	Kunststoff
LCA	Life circle Assesment, Lebenszyklusanalyse
LDPE	Low Density Polyethylene
LLDPE	Linear Low Density Polyethylen
LM	Lebensmittel
LVP	Leichtverpackungen
MFI	Melting Flow Index, Schmelzfluss-Index
MKS/MiKu	Mischkunststoffe
MOF	metal-organic framework
MPO	Mischpolyolefine
MVA	Müllverbrennungsanlage
NCY	New Cycling (Eigenname, Produktlinienbezeichnung der APK AG)
NIR	Nah-Infrarot
OMV	ehem. Österreichische Mineralölverwaltung AG (seit 1995 OMV)
PA	Polyamid
PBS	Polybutylensuccinat
PC	Polycarbonat
PCA	Postconsumer-Abfall
PCL	Postconsumer-Leichtabfall
PCM	Phase-Change-Materials (für Wärmespeicherung)
PCR	post consumer recycle, Rezyklate aus Verbraucherabfällen
PDS	Product Data Sheet (Produktdatenblatt)
PE	Polyethylen
PET	Polyethylenterephthalat
PET-A	PET (amorph)
PET-C	teilkristallines PET
PET-G	mit Glycol modifiziertes PET
PIA	Post Industrial Abfälle, Produktionsabfälle
PIR	Post Industrial Recycle, Rezyklate aus Produktionsabfällen
PLA	Polylactid
PMMA	Polymethylmethacrylat
PO	Polyolefine
POM	Polyoxymethylene
PP	Polypropylen
PPK	Papier, Pappe, Karton
PS	Polystyrol
PS-E	expandiertes Polystyrol

RCY	Recycling (Eigenname, Produktlinienbezeichnung der APK AG)
PVC	Polyvinylchlorid
RAL	Reichsausschuss für Lieferbedingungen (1925, heute Deutsches Institut für Gütesicherung und Kennzeichnung e. V.)
REACH	Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals
RFID	radio-frequency identification
rPET	Recycling-PET
SLF	Schredder-Leichtfraktion
StNVP	stoffgleiche Nichtverpackungen (auch StNVP)
SSP	Solid State Polycondensation (Festphasenpolymerisation)
SuV	Sammeln und Verwerten
TASi	Technische Anleitung Siedlungsabfall
THG	Treibhausgas
TK	Tiefkühlung
TLR	Technology Readiness Level
UBA	Umweltbundesamt
UBP	Umweltbelastungspotenzial
USt	Umsatzsteuer
UVgO	Unterschwelvenvergabeordnung
VerPackG	Verpackungsgesetz
VDI	Verband Deutscher Ingenieure
VDMA	Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e. V.
VgV	Verordnung über die Vergabe öffentlicher Aufträge
VIS	Visible spectra – sichtbare Lichtspektren
VKU	Verband kommunaler Unternehmen e. V.
WertstoffG	Wertstoffgesetz

Erläuterung zur Quellenangabe:

In diesem E-Book sind die Quellenangaben nummeriert. Im Fließtext wird die jeweilige Quellennummer in eckigen Klammern angegeben. Die vollständigen bibliografischen Angaben sind im Literaturverzeichnis unter der entsprechenden Nummer aufgeführt.

1 Zusammenfassung

Im Gegensatz zu anderen Materialien wie Papier oder Metallen wird bei Kunststoffen bisher nur ein geringer Teil des Abfalls wiederverwertet. Aufgrund fehlender Entsorgungsinfrastruktur landet weltweit ein Teil davon auch in der Umwelt, was die Dringlichkeit des Themas weiter verstärkt. In Deutschland werden aktuell weniger als 14 % der jährlich in den Stoffkreislauf eingebrachten Neuware werkstofflich in Form von Rezyklaten wiederverwertet, weniger als 1 % wird einer rohstofflichen Verwertung (chemisches Recycling) zugeführt.

Kunststoff ist trotz gleicher Bezeichnung nicht gleich Kunststoff, weil es sich um einen Mehrkomponentenwerkstoff unterschiedlicher Zusammensetzung und Eigenschaften handelt. Eine Sammlung gemischter Kunststoffabfälle kann deshalb trotz sehr guter Sortierung aktuell nur bedingt zu einem hochanspruchsvollen, speziellen Produkt führen, das eine definierte Kunststoffrezeptur aufweist.

Will man den Einfluss von Fremdstoffen, Begleitstoffen, heterogenen Komponenten, Additiven und unterschiedlichen Polymerbestandteilen auf die Minderung der Rezyklatqualität reduzieren, so müssen die Stoffströme möglichst hinsichtlich Verwertung definiert, spezifisch gesammelt und rezykliert werden.

In Summe bedeutet dies, dass derzeit aus sehr spezifischen Kunststoffen allenfalls ein letztlich gemischtes Rezyklat hergestellt werden kann. Dieses Rezyklat eignet sich selten für hochwertige Anwendungen. Soll ein möglichst geschlossener Recyclingkreislauf ermöglicht werden, wäre eine Wiederverwendung der daraus resultierenden Abfälle in genau demselben Einsatzgebiet mit dem gleichen Anforderungsprofil sinnvoll, da nur die alterungsbedingten Effekte durch Neuware (oder durch chemisches Recycling) kompensiert werden müssten.

Die Forderungen der Recyclingbranche sowie von Umweltverbänden an die Politik im Hinblick auf Gesetzesanpassungen sind von der neuen Bundesregierung z. T. schon als Aufgabe aufgenommen worden. Schwerpunkte sind:

- **KrWG:** Priorisierung der Abfallvermeidung; Produkt- vs. Abfallstatus; Ausbau der Pfandsysteme; Förderung des Absatzes von rezyklatbasierten Erzeugnissen.
- **VerPackG:** Präferenzierung von Mehrwegsystemen; recyclinggerechtes Verpackungsdesign; Vorgaben für Recyclingquoten von Verpackungen.
- **Lebensmittelrecht:** Neudefinition von Grenzen für Non-Food-Rezyklate in Food-Verpackungen bei gleichzeitiger Sicherung des Verbraucherschutzes; Verbreiterung der Rohstoffbasis für Lebensmittel- und Kosmetikverpackungen.
- **Chemisches Recycling:** muss als Verfahrensoption in allen relevanten Gesetzen verankert werden (KrWG, VerpackG, WertstoffG ...) – unter Beibehaltung der Priorisierung des werkstofflichen Recyclings und zur Verringerung des Anteils der thermischen Verwertung.
- **Mindestrezyklat-Einsatzquote:** produkt- sowie materialspezifisch national und auf EU-Ebene festschreiben; Steuerungsinstrumente zur Reduzierung des Anteils von Neuware-Kunststoffen.

Kunststoffabfälle aus nichtsortenreinen **Sammelsystemen** sind ein extrem heterogenes Gemisch, es muss mit Kontaminationen jeglicher Art gerechnet werden. Daher können Rezyklate im Rahmen des jetzigen Systems bis auf wenige Ausnahmen nicht in ihren ursprünglichen Einsatzfeldern verwendet werden. Neben Verunreinigungen spielt die Degradation der Kunststoffmaterialien eine Rolle.

Hinsichtlich der Sammelsysteme gibt es unterschiedliche Lösungsansätze. **Holssysteme** haben für den Verbraucher den Vorteil, dass er Abfälle leicht entsorgen kann. Die Sammelquoten sind hoch. Nachteil sind mögliche Kontaminationen und ein inhomogener Stoffmix, welcher einen hohen Anteil von nicht rezyklierbaren Kunststoffen enthält.

Bringsysteme, insbesondere Pfandsysteme, haben den Vorteil, dass sie weitestgehend sortenreine Stoffströme ermöglichen. Der Sortieraufwand nach der Sammlung ist gering bzw. überhaupt nicht vorhanden. Sichtweise ist hier, dass die genutzten Verpackungen zu keinem Zeitpunkt des Produktlebenszyklus Abfall sind. Es handelt sich immer um Produkte (Mehrwegsysteme) oder zumindest Rohstoffe (Einwegsysteme), die wiederverwendet werden sollen bzw. müssen. Auch das Pfand selbst hat hier eine wertvermittelnde Funktion.

Das **werkstoffliche Recycling** hat vom Stand der Technik her gute Voraussetzungen, hochqualitative Rezyklate herstellen zu können. Die technischen Grenzen liegen zum einen in der inhomogenen Qualität, in der Kunststoffalterung und der unzureichenden Sortiertiefe bei den Abfallgemischen.

Diese Grenze kann durch ein konsequentes **Design for Recycling** (D4R) sowie durch optimierte Sammelsysteme inkl. Mehrweg- und Pfandsysteme sowie Investitionen in moderne Sortier- und Verarbeitungstechnik nach oben verschoben, aber nicht prinzipiell verhindert werden. Rechtliche, strukturelle und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen sind weitere Gründe dafür, dass die durchschnittliche technische Ausstattung der Verwertungsbetriebe um einige Jahre hinter dem Stand der Technik liegt.

Das **chemische Recycling** ist vom Ansatz her ein Weg, für das werkstoffliche Recycling nicht oder nur mit hohem Aufwand verwertbare Kunststoffe mit unterschiedlichen Technologien in ihre polymeren Ausgangsstoffe oder andere chemische Crackprodukte zu zerlegen. Fremdstoffe, andere Kunststoffbestandteile oder Additive usw. können durch die chemische Aufbereitung ausgeschleust werden, sodass daraus wieder Virgin-Grade-Kunststoffe oder andere Chemieprodukte herstellbar sind. Der Energieaufwand für das chemische Recycling ist deutlich höher als beim mechanischen Recycling und kann nur dann gerechtfertigt werden, wenn kontaminierte Abfallströme, die für das mechanische Recycling nicht in Frage kommen, aber stofflich genutzt werden könnten, dadurch in den Wertstoffkreislauf zurückgeführt werden. – Unter der Maßgabe, dass der CO₂-Fußabdruck insgesamt geringer ist als bei einer thermischen Verwertung.

Technologische Reife (TLR): Beim mechanischen Recycling stehen grundsätzlich geeignete Technologien für hohe Rezyklatqualitäten zur Verfügung. Beim chemischen Recycling zur Herstellung von Rohstoffen für die Kunststoffproduktion gibt es nach Auffassung des Gutachterteams derzeit nur einige Pilotprojekte, die eine großtechnische Verwirklichung erhoffen lassen.

Inwieweit eine bestimmte Verwertungsrouten letztlich sinnvoll ist, hängt zunächst grundlegend davon ab, welche Mengen an Abfällen zur Verfügung stehen und welche Qualitäten sie aufweisen. Die Durchführung von Life Cycle Analysen (LCA) oder die Bewertung der Umweltauswirkungen erleichtern das

Treffen von strategischen Entscheidungen zur Weiterentwicklung und Förderung bestimmter Technologien.

Recyclingpfade: Grundsätzlich wird der ökologischste Weg von einer hohen Recyclingquote auf dem höchst möglichen Qualitätsniveau bestimmt. Das Hauptaugenmerk muss dabei weiterhin beim mechanischen Recycling liegen, das jedoch durch chemisches Recycling ergänzt werden sollte. Eine Kombination aus beiden Recyclingpfaden, also die werkstoffliche Verwertung geeigneter Abfälle und die chemische Verwertung kontaminierter, schlecht sortierbarer oder überalterter Kunststofffraktionen scheint ökologisch am sinnvollsten zu sein.

Dreh und Angelpunkt der Ökoeffizienz bleibt aber die Qualität bzw. die Werthaltigkeit der Abfälle selbst. Die energetische Verwertung ist erst dann eine Option, wenn der CO₂-Aufwand für das stoffliche oder das chemische Recycling größer wird als bei der Verbrennung oder wenn technische Grenzen keine qualitätsgerechten Folgeanwendungen der Produkte zulassen.

Die **Gestaltung der Verpackungen** selbst ist ein entscheidender Faktor für die Erhöhung des Rezyklateinsatzes. Der erreichte Entwicklungsstand bei den Bewertungsinstrumenten für die Recyclingfähigkeit von Kunststoffen scheint eine gute Basis zu sein, um diese Bewertungsinstrumente zu verbindlichen Standards und DIN-Normen für ein ökologisches Design for Recycling zu verdichten und damit zu europäischen Steuerungsinstrumenten zu machen.

Die **Digitalisierung**, die eine Nachverfolgbarkeit der Abfälle und damit ihrer Zusammensetzung ermöglicht, kann insbesondere bei der Ausschleusung gefährlicher Komponenten oder für das Recycling ungeeigneter Kunststoffteile, aber auch zur Gewinnung spezieller Wertstoffe zusätzlich zur Kunststoffsortenerkennung (IR- und Farbsortierung) angewandt werden.

Es wurden **drei Perspektiven** für gesellschaftliche und politische Handlungsoptionen entwickelt, von denen die erste Perspektive die Beibehaltung des Status Quo ist. Eine weitere Perspektive unterstellt eine restriktive Reglementierung der Kunststoffkreisläufe. Dabei werden die Stoffkreisläufe durch ein fachlich legitimierte, zentrales Gremium gelenkt und kontrolliert. Eine dritte – aus der Sicht des Autorenteam auch die beste – Perspektive ist die Umsetzung eines von allen Stakeholdern entlang der Wertschöpfungskette im

Konsens entwickelten Konzepts einer umweltgerechten und wertorientierten Sammlung und Verwendung von Kunststoffen. Hier werden Kunststoffverpackungen zu keinem Zeitpunkt des Produktlebenszyklus als Abfall, sondern im gesamten Kreislauf als Rohstoff für möglichst hochwertige Anwendungen bzw. als Produkt behandelt. Für eine solche Herangehensweise eignen sich Bring- und speziell Pfandsysteme besonders – in Verbindung mit einem konsequenten D4R, mit Sortier- und Verarbeitungstechnologien auf dem Stand der Technik und komplementiert durch das chemische Recycling.

2 Problemstellung und Ziele

„Kunststoffverpackungen sind erheblich besser als ihr Ruf – insbesondere hinsichtlich ihrer Klimawirkungen. Eine 0,5 l-Flasche für Ketchup aus Glas verursacht bspw. erheblich höhere Treibhausgasemissionen (290 g CO₂-Äquivalente) als eine Verpackung derselben Größe aus Polyethylenterephthalat (PET) (196 g CO₂-Äquivalente). Wird für die Kunststoffflasche ein Rezyklatgehalt von 50 % angenommen, verbessert sich der CO₂-Fußabdruck weiter (171 g CO₂-Äquivalente).“ [2]

„Der Ersatz von Kunststoffverpackungen durch Papierverbunde ist Greenwashing. Wenn es bei der Verpackung auf die besonderen Eigenschaften des Materials Kunststoff ankommt, dann sollte auf Papierfasern komplett verzichtet werden und eine voll recyclingfähige Kunststoffverpackung gewählt werden.“ [3]

„In der Gesamtschau aller Ergebnisse der untersuchten Einwegbecher für Heißgetränke lässt sich festhalten, dass unter den aktuellen durchschnittlichen deutschen Verhältnissen die Polystyrolbecher das vorteilhafteste ökobilanzielle Ergebnis zeigen.“ [4]

Derartigen Aussagen scheinen dem Zeitgeist zu widersprechen, weil häufig von bestimmten Annahmen und vermeintlichen Gewissheiten hinsichtlich der Nachhaltigkeit von Kunststoffen ausgegangen wird. Erforderlich ist also eine rein wissenschaftliche Betrachtungsweise der Problemlage beim Kunststoffrecycling, um so schnell wie möglich und auf dem direkten Weg zu einer effizienten und möglichst vollständigen Kreislaufwirtschaft zu kommen. Diese ist bei allen Rohstoffen, nicht zuletzt auch bei Kunststoffen, erklärtes Ziel der Umweltpolitik in Deutschland.

Im Gegensatz zu anderen Materialien wie Papier oder Metallen wird im Kunststoffrecycling bisher nur ein kleiner Teil des Kunststoffabfalls wiederverwertet. Ein großer Teil landet weltweit in der Umwelt, was die Dringlichkeit des Themas weiter verstärkt. In Deutschland werden aktuell weniger als 14 % der jährlich in den Stoffkreislauf eingebrachten Neuware werkstofflich in Form von Rezyklaten wiederverwertet, weniger als 1 % wird einer rohstofflichen Ver-

wertung (chemisches Recycling) zugeführt [5]. Die überwiegende Menge der Kunststoffabfälle wird nur thermisch-energetisch verwertet. Bei bestimmten Abfallströmen wird gänzlich auf den Versuch verzichtet, die Kunststoffe einer stofflichen Verwertung zugänglich zu machen. Beispielsweise ist dem Gutachterteam kein Versuch bekannt, die Kunststofffraktionen, die im Hausmüll enthalten sind, für ein Kunststoffrecycling herauszutrennen. Bundesweit sind hier im Durchschnitt 6,7 % Kunststoffe enthalten, nach Biomasse und Hygieneartikeln die drittstärkste Fraktion [6]. Die im Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG) vorgeschriebene Priorisierung der stofflichen vor der thermischen Verwertung konnte bislang – und kann auch künftig in kurzfristigen Zeiträumen – in der Wirtschaftspraxis des Kunststoffrecyclings allenfalls punktuell umgesetzt werden. Mittel- und langfristig jedoch müssen Politik, Industrie, Landwirtschaft, Handel und Verbraucher eine Trendwende herbeiführen – und bereits heute damit beginnen.

Kunststoffrezyklate werden aus dem Recycling von Produktions- und Verarbeitungsabfällen (PIR – post industrial recyclate) oder Post-Consumer-Abfällen (PCR – post consumer recyclate) gewonnen. Die Aufbereitung zu Rezyklat erfolgt in Form von Mahlgütern, Regranulaten, Regeneraten bzw. Compounds, oder Agglomeraten.¹ Das hergestellte Rezyklat soll erneut in der Verarbeitung zu Kunststoffprodukten eingesetzt werden und dabei materialidentische Neuware oder andere Materialien wie Holz und Beton ersetzen [7].

Der Anteil der werkstofflichen Verwertung von Produktionsabfällen aus der Kunststoffherstellung und -verarbeitung zu Rezyklaten beträgt rd. 90 % [8]. Dagegen werden von den **Verpackungen und Kunststoffen in den Post-Consumer-Abfällen** nur 10,9 % zu Rezyklaten verarbeitet [5]. Die Verwertung dieser Kunststoffabfälle stellt somit die größte Quelle für eine signifikante Erhöhung der Recyclingquote dar und soll daher ins Zentrum der Studie gestellt werden. In der Studie werden die unterschiedlichen Grade der Rück-

¹ Rezyklat ist ein Überbegriff für aufbereiteten Kunststoff mit definierten Eigenschaften. Mahlgut wird durch Mahlen von Kunststoff gewonnen, hat unregelmäßige Teilchengrößen von 2–5 mm und kann Staubanteile enthalten. Regranulat wird aus Mahlgut über einen Schmelzprozess als Granulat gewonnen, hat gleichmäßige Korngröße, keinen Staubanteil und ist problemlos weiterzuverarbeiten. Regenerat wird aus Mahlgut oder Regranulat über einen Schmelzprozess (Compoundieren) unter Zugabe von Additiven zur Eigenschaftsverbesserung hergestellt. Agglomerat oder Kompaktat wird aus Folien-Mahlgut hergestellt, das sich durch Erwärmung verkugelt und teilplastifiziert wird.

gewinnung von Kunststoffen zur Herstellung von Rezyklaten bei den einzelnen Abfallströmen im Post-Consumer-Bereich dargestellt. Die Differenzierung der Recyclingquoten erfolgt hier **nach Kunststoffarten**. Ziel ist es,

- die Ursachen für den bislang geringen Aufbereitungsgrad insbesondere bei Verpackungsabfällen aus den jeweiligen Kunststoffen zu identifizieren,
- die Hemmnisse für eine Wiederverwertung herauszuarbeiten, wobei hier technologische, produktseitige, wirtschaftliche und rechtliche Hemmnisse beleuchtet werden, und
- Vorschläge abzuleiten, die zu einer Erhöhung der Recyclingquoten sowie der Verwendung von Rezyklaten im Sinne einer modernen circular economy beitragen können.

Methodisch wurden zur Beantwortung dieser Fragen – neben der Nutzung der kumulierten Ergebnisse aus langjähriger Forschungsarbeit der Autoren für die Branche sowie einer Recherche neuer Publikationen – die vorhandenen Kontakte zu Recyclingunternehmen sowie zu unterschiedlichen Know-How-Trägern der einzelnen Stufen bzw. Technologieanbietern des Wertschöpfungskreislaufs genutzt. Ein wichtiges Tool war eine standardisierte Befragung zum technischen Stand, zu den Herausforderungen und Hemmnissen sowie den Potenzialen von breiten Rezyklatanwendungen, ergänzt durch Interviews mit verschiedenen Akteuren der Branche.

Besonderes Augenmerk liegt dabei auf den Regularien für die Absatzmärkte, weil diesen eine Schlüsselrolle bei der Überwindung vorhandener Barrieren für eine Erhöhung der Substitutionsquote in der Kunststoffbranche zukommt. So stellen Rezyklate z. B. bei der Verwendung im Lebensmittelbereich ein großes Problem dar, da der Lebensmittelkontakt mit bestimmten Kunststoffadditiven und Kontaminationen gesetzlich vermieden werden muss.

Die Fragestellungen werden primär aus wissenschaftlicher Perspektive unter Einbeziehung einer Vielzahl von vorliegenden Studien bearbeitet, aber auch aus wirtschaftlicher sowie NGO-Perspektive (z. B. NABU, Zero Waste Europe, Cradle to Cradle e. V.) beleuchtet.

3 Studiendesign

Auf der Grundlage von Erkenntnissen aus früheren Arbeiten der Autoren sowie vorliegender Studien wurden Arbeitshypothesen formuliert. Zur Verifizierung einzelner Aspekte erarbeitete das Projektteam einen Fragenkatalog, um Expertenmeinungen zum Thema einzuholen, die die Arbeitshypothesen stützen, ergänzen oder in Frage stellen sollten. Die Befragung wurde an Verbände und Unternehmen im Netzwerk geschickt und war online auszufüllen (siehe Anlage 2). Da die Weiterleitung des Links durch Verbände ausdrücklich erwünscht war, ist eine exakte Rücklaufquote nicht sinnvoll feststellbar.

- Die Resonanz war mit 81 Rückläufen überraschend hoch. Davon waren 17 Antwortende direkt in der Recyclingbranche tätig, 59 waren (potenzielle) Anwender von Rezyklaten und 4 gruppierten sich unter „sonstige“ ein.
- Namentliche Nennung war möglich, aber nicht zwingend. Von den 81 Antworten haben 45 ihren Namen und Institution angegeben. Eine Veröffentlichung der persönlichen Daten ist nicht vorgesehen. Die Liste der Institutionen ist unter Anlage 2 zu finden.
- Weiterhin gab es einzelne klärende Gespräche mit Akteuren.

Begleitend wurde eine erweiterte Literaturrecherche zur Themenstellung insbesondere hinsichtlich zukünftiger Entwicklungen vorgenommen.

Auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse konnten die wesentlichen Hemmnisse für bessere Verwertungsquoten bis hin zu Optionen für mögliche Verbesserungen im Kunststoffverpackungsrecycling aufgezeigt werden.

Dazu wurde untersucht, wie die unterschiedlichen branchentypischen Zielgrößen beim Recycling von Kunststoffverpackungen (z. B. Reinheit, Verwertungsmengen, Substitutionsquote, Umweltentlastungspotenzial, Verbraucherschutz oder Wirtschaftlichkeit) oftmals im Widerspruch zueinander stehen bzw. sich auch ergänzen. Es wurde versucht, die angestrebten Zielgrößen so darzustellen, dass sie dem Komplexitätsgrad der Aufgabenstellung entsprechen, aber auch, vereinfacht, für die Wahl geeigneter Entscheidungsoptionen sowohl für die Politik als auch für die Branchenakteure und Verbraucher gerecht werden. Einen Überblick über den Aufbau gibt Abb. 1.



Abb. 1: Studiendesign (eigene Darstellung)

Zunächst wird dazu der Stand der Wiederverwertung von Abfällen aus Kunststoffen dargestellt. Dabei wird das Hauptaugenmerk auf die Rahmenbedingungen, die verschiedenen Recyclingpfade und die derzeitigen Hemmnisse für das Recycling gelegt. Im nächsten Schritt werden die Steigerungspotenziale zunächst allgemein, dann speziell die gesetzlichen Regelungen und die Möglichkeiten der Digitalisierung abgebildet. Im Abschnitt Perspektiven werden kurz-, mittel- und langfristige Verbesserungspotenziale abgeleitet. Mögliche Zielsetzungen und Zielkonflikte folgen. Am Ende werden exemplarisch drei Handlungsoptionen für die Branchenakteure und die Politik diskutiert.

4 Stand der Wiederverwertung von Abfällen aus Kunststoffverpackungen

4.1 Grundlegende Rahmenbedingungen

Dem Aufwand zur Trennung der einzelnen Kunststoffabfallbestandteile sind prinzipiell wenig Grenzen gesetzt. Jedoch muss dieser Aufwand immer mit dem ökologischen und wirtschaftlichen Nutzen abgeglichen werden. Die Kunststoffabfälle müssen immer in ihrer komplexen Zusammensetzung gesammelt, sortiert und entsprechend aufgearbeitet werden. Dabei gilt es, zunächst werkstoffseitig die physikalischen und chemischen Grenzen zu kennen und in der Bewertung zu berücksichtigen. Gleichzeitig müssen alle rechtlichen Aspekte betrachtet werden, da Hersteller und Verarbeiter von Rezyklaten Gewährleistungspflichten unterworfen sind und in der Produkthaftung stehen. Im Zusammenspiel rechtlicher und technischer Aspekte ergibt sich die Wirtschaftlichkeit. Nur wenn das Anforderungsprofil von rezyklatbasierten Produkten und der dazugehörige technische Aufwand bekannt sind, kann eine wirtschaftliche Bewertung von Recyclingprozessen erfolgen.

4.1.1 Werkstoffliche Rahmenbedingungen

Will man Kunststoffe wieder in ihrer ursprünglichen Form einsetzen, so muss vorher eine Trennung aller im Abfallstrom befindlicher Komponenten erfolgen (siehe 4.2.2). Dabei können Fremdstoffe, Begleitstoffe, Kunststoffe als Grundwerkstoffe und zusätzliche Komponenten in Verbundwerkstoffen im Abfallstrom auftreten.

Eine Trennung in alle Einzelkomponenten ist so gut wie unmöglich. Machbar ist nur eine entsprechende Separierung in typische Fraktionen mit gemischten Eigenschaften. Um die Komplexität des Werkstoffs Kunststoff aufzuzeigen, folgt eine Kurzbeschreibung der wesentlichen Bestandteile.

Einschränkend muss dazu vorab bemerkt werden, dass es sich bei den hier betrachteten Kunststoffen ausschließlich um thermoplastische, also unver-

netzte Polymerwerkstoffe handelt, die z. B. typisch für Verpackungen sind. Für vernetzte Polymere bzw. Kunststoffe wie Elastomere (Gummiprodukte, Autoreifen etc.) und Duromere (Behälter, WC-Sitze, Laminat, Zahnräder, Steckdosen etc.) kann aufgrund der chemischen Struktur ein Wiederaufschmelzen, wie es für ein werkstoffliches Recycling notwendig ist, nicht erfolgen. Der Anteil dieser duro- und elastomeren Kunststoffe beträgt ca. 25 % der weltweiten Kunststoffproduktion. Elastomere und Duroplaste können zum Teil, wie bei der Reifenpyrolyse, rohstofflich wiederverwertet werden. Wie aber noch gezeigt werden wird, stellen für das chemische Recycling eben diese Komponenten auch ein Risiko in der Verwertung dar. Elastomere sind eine eigenständige Abfall- bzw. Wertstoffgruppe und werden im Folgenden nur unter dem Gesichtspunkt als Störstoff im Kunststoffabfall behandelt. Das Recycling von Elastomeren (umgangssprachlich Gummirecycling), ist ein ganz anderer, aber ebenso komplexer Prozess wie das Recycling von thermoplastischen Kunststoffen und kann daher nur im Rahmen einer eigenen Studie erfolgen – ebenso wie das Recycling von duromeren Kunststoffen.

1.) Fremdstoffe in Kunststoffabfällen

Fremdstoffe sind nicht Bestandteil der Kunststoffprodukte, sondern kommen durch eine Zusammenentsorgung (z. B. Fehlwürfe, Anhaftungen, Inhaltsreste von Verpackungen) mit den Kunststoffen aus der Gelben Tonne oder den Wertstoffhöfen in die Recyclingströme. Das sind z. B. Nichtkunststoffe, Kunststoffe, die einen anderen Verwertungsweg hätten nehmen sollen (z. B. bioabbaubare Folien, die schlecht von PE-Folien getrennt werden können), Giftstoffe (z. B. Batterien, Chemikalien), Produktreste (z. B. Reinigungsmittel, Lebensmittelreste mit Biokulturen).

Bedeutend ist hier, dass die Kunststoffrezyklate – je nach Sorte und deren Aufnahmebarkeit – derartige Kontaminationen aus den Fremdstoffen enthalten können. Ein unangenehmer Geruch von Rezyklaten, die aus einer gemischten Sammlung stammen, ist immer ein Indiz für eine Kontamination. Eine Migration dieser Stoffe aus dem Kunststoffrezyklat in ein z. B. verpacktes Lebensmittel kann bei Kontakt also nicht ausgeschlossen werden. Um eine Kontamination der Rezyklate zu verhindern, wäre eine selektive Sammlung geeigneter Materialien notwendig. (siehe Abschnitt 3.1.2)

2.) Begleitstoffe der Kunststoffprodukte

Begleitstoffe sind eng mit dem Kunststoffprodukt verbunden. Das bedeutet, dass sie selbst zwangsläufig über das Kunststoffprodukt in die Abfallströme gelangen. Das sind z. B. Etiketten, Klebstoffe, Lackierung.

Diese müssen im Recyclingprozess abgetrennt werden und führen zu Reststoffen. Dabei können die Rezyklate aber auch Verunreinigungen durch diese Begleitstoffe enthalten, die die Qualität des Rezyklates u. U. beeinträchtigen.

3.) Kunststoffe, ein Mehrkomponentengemisch

Kunststoffe sind als Grundwerkstoffe in der Regel ein Mehrkomponentengemisch aus Additiven (Lichtstabilisatoren, Oxidationsstabilisatoren, Gleitmittel etc.), Pigmenten, Farbstoffen und natürlich dem eigentlichen Polymer. Polymere sind organische Verbindungen von sehr langen, sogenannten Makromolekülen. Die Bausteine, aus denen die Makromoleküle aufgebaut sind, nennt man Wiederholeinheiten, umgangssprachlich auch Monomere. Es existiert eine Vielzahl von unterschiedlichen Polymertypen, die chemisch unterschiedlich aufgebaut sind. Die chemische Bezeichnung wird in der Regel als Abkürzung verwendet. (siehe [9]). Die Polymere selbst werden

- homogen bestehend nur aus einem Polymertyp, einem sogenannten Homopolymer, z. B. Polyethylen (PE), Polystyren (PS) oder Polyethylenterephthalat (PET),
- als Copolymere (chemische Mischung verschiedener Polymertypen) oder
- als Polymerblends (physikalische Mischung mehrerer Polymertypen)

eingesetzt. Je nach originärer Anwendung besteht der verwendete Grundwerkstoff für den Einsatz aus einer genau abgestimmten Rezeptur (siehe Abb. 2).

Technologie	Zusatzstoff	gewünschte Eigenschaftsänderung
Modifizieren, Blenden	Elastomere, Schlagzähmodifikatoren	Zähigkeitsverbesserung
Verstärkung	Langfasern, Kurzfasern	Festigkeits- und Steifigkeitserhöhung
Füllung	Mineralische, biologische Füllstoffe	positive ökonomische Effekte
Zusatz von Hilfsstoffen	Farbstoffe	Farbigkeit
	Nukleierungsmittel	höhere Kristallinität, günstigere Verarbeitbarkeit
	Haftvermittler	Verbesserung der Wirksamkeit von Füllung und Verstärkung
	Stabilisatoren	Verminderung unerwünschter Effekte, Alterung

Tab. 1: Möglichkeiten und Eigenschaften durch Zusatzstoffe (Quelle: eigene Darstellung)

Wichtige Möglichkeiten der Eigenschaftsveränderungen durch Zusatzstoffe sind in Tabelle 1 zusammengestellt.

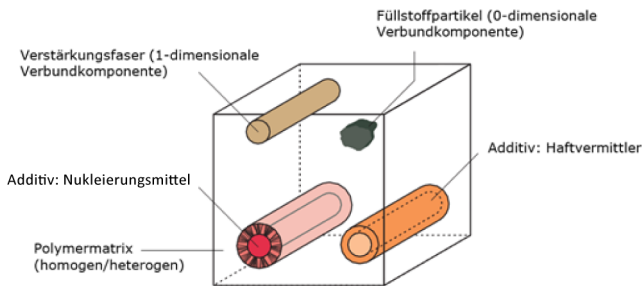


Abb. 2: Zusammensetzung von Kunststoffen als Grundwerkstoffe: Möglichkeiten der Additivierung (eigene Darstellung)²

Bei der Abfallsammlung und Rezyklatherstellung werden somit unterschiedliche Rezepturen miteinander zu einem Mischrezyklat verschnitten, das im Vergleich zu den originären Anwendungsbereichen abweichende Eigenschaften entsprechend der Mischungsbestandteile aufweist. Optisch gesehen wird z. B. aus Kunststoffabfällen unterschiedlicher Farbe ein graues Regranulat. Auch wenn eine Farbsortierung spezifischere Rezyklatfarben ermöglicht, so ist eine Sortierung aus gemischten Kunststoffabfällen hinsichtlich aller Kunststoff-

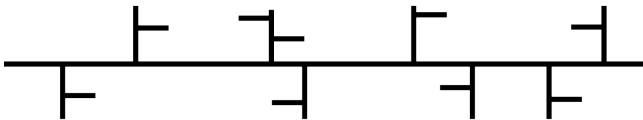
² Der Würfel in Abb. 2 stellt die Polymermatrix dar, während die verschiedenen farbigen Teile die Additive, Fasern und Füllstoffe symbolisieren.

komponenten-Eigenschaften unmöglich. (Um einen Eindruck über die extreme Vielfalt von Additiven zu bekommen, sei auf *Ralph D. Maier, Michael Schiller, Handbuch Kunststoff-Additive* [10]) mit 1.291 Seiten (!) verwiesen.)

Selbst wenn die Homopolymere als Grundwerkstoffe von Verpackungen verwendet werden, können trotz gleichem Recycling-Code, der gesetzlich vorgeschriebenen Kennzeichnung von Verpackungen (siehe Piktogramm rechts), große Unterschiede bezüglich der molekularen Struktur bestehen. Polymere werden je nach Anwendungsbereich und Verarbeitungsansprüchen mit unterschiedlicher Kettenlänge und/oder Kettenlängenverteilung eingesetzt. Auch unterschiedliche Wiederholeinheiten im Makromolekül können zum Einsatz kommen. Neben herkömmlichem PET wird z. B. mit Glykol modifiziertes PET-G verwendet, um die Kristallisation zu verhindern und eine durchsichtige Qualität für die Flaschenproduktion zu erhalten. Gleiche Polymertypen können auch unterschiedliche Verzweigung der Polymerkette aufweisen, was sich dann in unterschiedlichen Dichten des Polymerwerkstoffs äußert (siehe Abb. 3).



Polyethylen-Low Density (PE-LD)



Polyethylen-High Density (PE-HD)

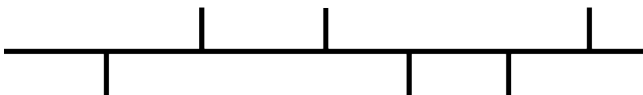


Abb. 3: Schematische Darstellung der molekularen Struktur von Polyethylen (eigene Darstellung)

Abb. 3 zeigt die molekulare Struktur von Polyethylen PE-LD (Low Density) mit Kettenverzweigungen für Folien oben und PE-HD (High Density) ohne Verzweigungen für die Herstellung von Hohlkörpern, z. B. Shampoo-Flaschen (unten).

Hinzu kommen bei einem Mehrfachgebrauch von Kunststoffen (mehrere Recycling-Zyklen) Alterungseffekte, die sich grundlegend im Verarbeitungsverhalten auswirken und zu Qualitätseinbußen bis hin zum Ausschuss führen können (Abb. 4). Auf der Ordinatenachse sind die Werte des MFI³ abgebildet, während die Abszissenachse die Anzahl der Spritzgussprozesse⁴ resp. Extrusionsprozesse⁵ darstellt, die das Material durchlaufen hat.

Die Durchführung von Life Cycle Analysen (LCA) oder die Bewertung der Umweltauswirkungen des Recyclingprozesses erleichtern das Treffen von strategischen Entscheidungen zur Wahl der optimalen Recyclingpfade für die jeweiligen Kunststoffe sowie zur Weiterentwicklung und Förderung bestimmter Verwertungstechnologien. Eine Trennung der Kunststoffe nach spezifischen Kunststoffeigenschaften ist jedoch aktuell nicht möglich und führt ebenso wie bei den anderen Kunststoffbestandteilen zu Mischqualitäten im Rezyklat.

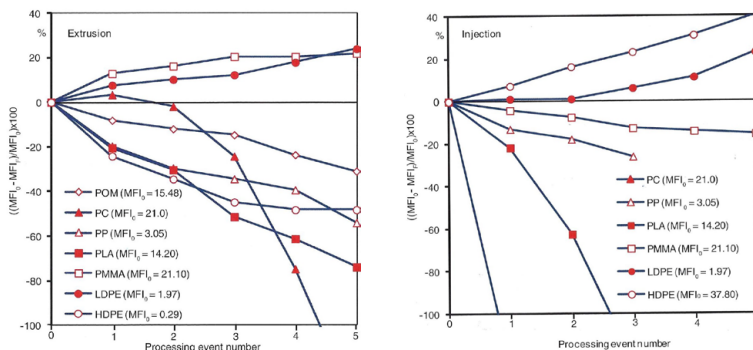


Abb. 4: Änderungen des MFI in Abhängigkeit von der Zyklenzahl im Extrusionsprozess (links) bzw. Spritzguss (rechts) [11, S. 18]

Wird wie bei der Materialalterung ein ganzer Recyclingkreislauf betrachtet, so werden zusätzlich sogenannte Monorezyklate, Rezyklate aus nur einer Quelle, zur Herstellung verwendet. Aufgrund der faktisch nicht praktikablen Trennung von unterschiedlichen Compounds (z. B. PE-beschichtete PET-Schalen) wer-

3 Der MFI (Melt Flow Index) ist eine Kenngröße zur Charakterisierung der Fließfähigkeit von Polymerschmelzen. Durch Mehrfachverarbeitung verändert sich die Struktur der Polymere, was u. a. zu Änderungen in der Fließfähigkeit führt.

4 Vgl: <https://de.wikipedia.org/wiki/Spritzgießen>

5 [https://de.wikipedia.org/wiki/Extrusion_\(Verfahrenstechnik\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Extrusion_(Verfahrenstechnik))

den jedoch zusätzlich Fremdkunststoffe in das Kunststoffbauteil und danach wieder in das Rezyklat eingebracht (siehe Abb. 5) [12, S. 13285].

Trotz eines Fremdpolymeranteils bis 5 % wird hier von einem Monomaterialrezyklat gesprochen. Die Autoren der GVM-Studie merken eine Akkumulation von Fremdstoffen im Rezyklat [13] an, da pro Durchlauf des Recyclingkreislaufs z. B. 5 % Fremdkunststoff immer wieder zusätzlich in das bereits verunreinigte „Monomaterial“ eingebracht werden [14, S. 77].

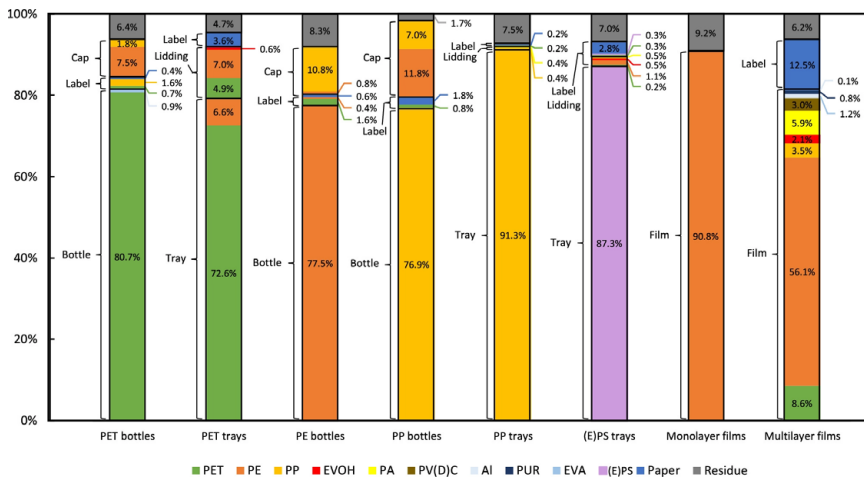


Abb. 5: Polymerzusammensetzung und Rückstandsgehalt (Residue) der verschiedenen Abfallkategorien: Deckel, (Cap), Etikett (Label), Flasche (Bottle), Abdeckmaterial (Lidding), Schale (Tray) und Folie (Film) [12, S. 13285]

Abb. 5 zeigt die trennbaren Bestandteile jeder spezifischen Abfallkategorie (z. B. in eine Flaschen-, eine Etiketten-, eine Verschluss- und eine Rückstandsfraktion für den PET-Flaschenstrom). Nichtabtrennbare Bestandteile führen beim Recyclingprozess dann zu sogenannten Monomaterialien mit einem geduldeten Fremdstoffanteil kleiner 5 % (hier z. B. bei PET-Trays sogar 6,6 % PE). Dies zeigt, wie wenig echte Monomaterialien tatsächlich zur Verfügung stehen.

4.) Zusätzliche Komponenten:

Zusätzliche Komponenten in Kunststoffen werden häufig zur Erfüllung der Produktspezifikationen oder zur Steigerung der Wirtschaftlichkeit eingesetzt. Es handelt sich dabei um Verbundwerkstoffe mit mindestens zwei verschiedenen Komponenten. Die Klassifizierung der Verbundwerkstoffe kann über die geometrische Form der zweiten Komponenten in null- bis dreidimensionale⁶ Verbunde (Teilchen-, Faser-, Schicht- und Durchdringungsverbunde) erfolgen. Sie sollen die mechanischen oder die Barriereigenschaften (Undurchlässigkeitseigenschaften) verbessern. Beispiele aus dem Bereich der Verpackungen sind z. B. Multilayerfolien mit Barrierschichten, metallbedampfte Folien oder faserverstärkte Behälter usw.

Abb. 6 zeigt eine beispielhafte rasterelektronenmikroskopische (REM) Aufnahme einer Verpackungsfolie (zweidimensionale Verbundfolie) mit verschiedenen funktionalen Schichten aus unterschiedlichen Polymeren im Bereich der Siegelnaht. Links die Detaildarstellung der Struktur der Polymerschichten (a) und rechts die Kavitäten (Hohlräume) innerhalb der PE-LD-Matrix und vermutete sphärische iPB-1-Domänen (kugelförmig abgegrenzter Bereich) (b).

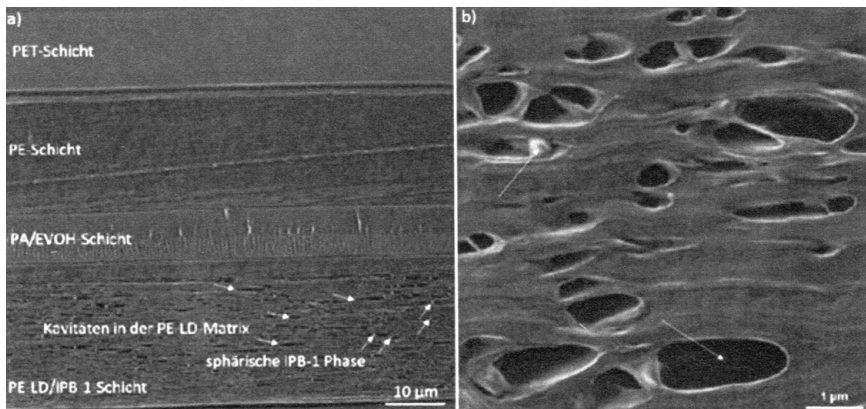


Abb. 6: REM-Aufnahmen einer Multilayer Verpackungsfolien (Peelfolie) [15, S. 85]

6 Siehe https://de.wikipedia.org/wiki/Nulldimensionaler_Raum#Definition

Berechtigte Forderungen von Experten zielen deshalb auf eine Neubewertung: *„Chemiker fordert Umdenken bei Plastik. 600 Chemikalien in einem Joghurtbecher sind irre.“* [16]

Zwischenfazit:

Kunststoff ist trotz gleicher Bezeichnung nicht gleich Kunststoff, weil es sich um ein Mehrkomponentengemisch unterschiedlicher Zusammensetzung und Eigenschaften handelt. Eine Sammlung gemischter Kunststoffabfälle kann deshalb trotz sehr guter Sortierung kaum zu einem hochanspruchsvollen, speziellen Produkt führen, das eine definierte Kunststoffrezeptur aufweist.

Will man den Einfluss von Fremdstoffen, Begleitstoffen, heterogenen Komponenten, Additiven und unterschiedlichen Polymerbestandteilen auf die Minderung der Rezyklatqualität reduzieren, so müssen die Stoffströme möglichst hinsichtlich Verwertung definiert, spezifisch gesammelt und recycelt werden.

4.1.2 Recyclingbedingte Rahmenbedingungen hinsichtlich Kunststoffsammlung, -sortierung und -verwertung

Die im Recycling einsetzbaren Kunststoffabfälle stammen hauptsächlich aus getrennten Erfassungssystemen. Kunststoffverpackungen werden insbesondere über die dualen Systeme, brancheneigene und andere gewerbliche Sammelsysteme erfasst (siehe [17, S. 93]). Als Abfall liegen trotz der getrennten Sammlung, wie oben erwähnt, gemischte Kunststoffqualitäten vor.

Jährlich werden weltweit rund 370 Mio. Tonnen (Mio. t) Kunststoff produziert, davon knapp 54 Mio. t innerhalb der Europäischen Union [18]. Von den in der EU gesammelten 29 Mio. t Kunststoffabfällen (Post-Consumer) wurden 2018 nach wie vor rund zwei Drittel der Abfälle nicht recycelt. Stattdessen wurden rund 43 % der Abfälle energetisch verwertet und ein Viertel auf Mülldeponien entsorgt [19]. Die Menge der Kunststoffabfälle (Verpackungen, Bau, Automobil, Elektronik etc.) wurden in Deutschland 2019 auf 5,35 Mio. t Kunststoff-Post-Consumer-Abfälle beziffert [5, S. 12]. Weitere Datenquellen für die Bewertung der Stoffströme sind die Erfassung der Abfallmengen des

Statistischen Bundesamts [20] und die entsprechenden Bilanzierungsmodelle (z. B. nach Steger et al. [21, S. 110 Anhang]). Exemplarisch sind die Stoffströme für Kunststoffe in Deutschland in Abb. 8 dargestellt.

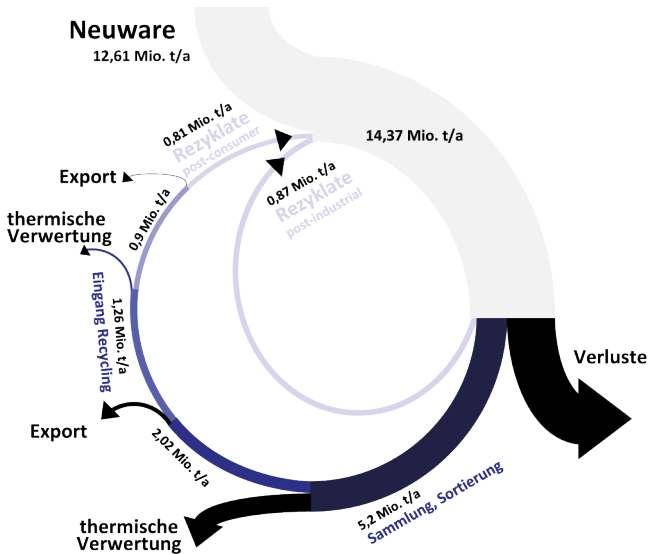


Abb. 8: Vereinfachter Stoffkreislauf für Kunststoffe aus [22] nach CONVERSIO 2017 [7, S. 14, 15]

Exkurs 1

Statistisch-methodische Prämissen der Ermittlung von Recyclingquoten

Um eine qualitative und quantitative, vergleichende Bewertung des aktuellen und des künftigen Entwicklungsstandes beim Kunststoffrecycling zu ermöglichen, bedarf es zunächst einheitlicher Kennwerte bei der Erhebung der statistischen Daten. Zentrales Kriterium ist hier die stoffliche Verwertungsquote bei Kunststoffabfällen. So wurde für 2019 vom Umweltbundesamt (UBA) eine Quote von 55,5 % = 1.763,7 Mio. t für das stoffliche Recycling bei Verpackungsabfällen aus Kunststoff bei einem Aufkommen von 3.180,2 Mio. t ausgewiesen [17, S. 37].

Bemessungsgrundlage für diese hohe Quote war jedoch nicht das Verhältnis zwischen finaler Rezyklatmenge zur Menge, die über die Abfallsammlung für ein Recycling zur Verfügung stand, sondern zur Menge, die nach der Störstoffabtrennung in der 1. Stufe der Sortierung in die nachfolgenden Verarbeitungsstufen gingen. Zudem flossen in die Quote der stofflichen

Verwertung teilweise Mehrweggetränkeflaschen aus Abfallbetrieben ein, die gar nicht durch eine Aufbereitungsanlage, sondern in den nächsten Umlauf gegangen sind [17, S. 154, 156]. Entscheidend für die große Differenz war jedoch, dass als Bemessungsgrundlage für die Verwertungsquote die Inputmenge in die erste Recyclinganlage herangezogen wurde. Dabei galten Verarbeitungsschritte wie Störstoffabtrennung oder Reinigung, bei denen die sortierten Abfälle für den letzten Recyclingschritt weiter aufbereitet wurden, bereits als realisiertes Recyclingverfahren. Die bis zum finalen Produkt im Prozess ausgeschleusten Sortierabfälle gingen statistisch in die Quote für das stoffliche Recycling ein, obwohl sie letztlich thermisch verwertet wurden. Daraus ergab sich – im Übrigen europaweit – über Jahrzehnte ein faktisch geschöntes Bild über die „Erfolge“ des werkstofflichen Recyclings und damit wenig Anlass, erhöhte Anstrengungen für Verbesserungen zu unternehmen.

Dank dem Institut cyclus-htp [23] von Joachim Christiani, dem conversio-Team und anderen wurden bereits ab 2011 umfangreiche individuelle Erhebungen durchgeführt, welche die offiziellen Bewertungen zunehmend infrage stellten. Mit dem Durchführungsbeschluss 2019/665 der EU und den folgenden nationalen Gesetzesnovellen (z. B. VerPackG von 2021 in Deutschland) wurde schließlich eine wesentliche statistische Korrektur vorgenommen. Danach ist die Recyclingquote zu bestimmen als Verhältnis zwischen der durch die Hol- und Bringsysteme erfassten Abfallmenge bei der Zufuhr zum Recyclingverfahren einerseits im Verhältnis zur daraus generierten Rezyklatmenge andererseits. Die seit dem 1.1.2022 erhobenen offiziellen Daten nach der neuen Berechnungsmethodik dürften daher realistischere Quoten für das werkstoffliche Recycling abbilden, erschweren aber auch Vergleiche von aktuellen mit historischen Zahlenangaben.

Die reale Verwertungsquote für Kunststoffverpackungen auf Basis der korrigierten statistischen Berechnung liegt lt. Conversio-Studie 2020 daher nur bei 10,9 % (2019) und macht noch einmal die Notwendigkeit grundlegender Veränderungen im deutschen Kunststoffrecycling deutlich [5], [7]⁸.

8 Zu beachten ist, dass auch die neue Berechnungsmethode mindestens eine große Unschärfe enthält: So wird die Differenz der Menge an in Verkehr gebrachten Kunststoffprodukten und -verpackungen einerseits und der Menge der durch die Sammelsysteme erfassten Kunststoffabfälle andererseits nicht berücksichtigt. Diese Differenz entsteht u. a. durch Littering (Kunststoff gelangt unkontrolliert in die Umwelt), Fehlwürfe bei der Entsorgung, privates Verbrennen etc. Vor diesem Hintergrund ist die reale Recyclingquote stets geringer als die offizielle statistisch erhobene.

in kt	2015	2016	2017	2018	2019	Erläuterung/ Datenquelle
Duale Systeme	1.217,1	1.178,0	1.209,6	1.172,3	1.256,0	nach Angaben aller dualen Systeme
Branchenlösungen, Sonstige Rücknahmesysteme	220,0	270,8	258,0	288,7	268,6	Branchenlösungen; Rückführung über gewerbliche Sammel-systeme (z. B. Interseroh, RI GK), Eigenrücknahme von Kunststoffverpackungen (bis 2014)
Korrektur wegen Überschneidung mit Aluminium-Verwertung	14,8	14,5	14,1	16,1	19,3	geschätzte Menge von aluhaltigen Verbunden auf Kunststoffbasis, die mit der Alu-Fraktion einer Verwertung zugeführt werden; stoffliche Verwertung im Inland
Verwertung von Mehrweg-Verpackungen (Verschlüsse, Kästen, Flaschen etc.)	195,7	203,1	210,7	220,2	228,3	Schätzung auf Basis der Zukäufe, Rücklauf- und Verlustquoten sowie auf der Basis der Angaben von Mehrweg-abfüllern (z. B. Gerolsteiner)
Verwertung von bepfandeten Kunststoff-Einweg-Flaschen	410,7	408,8	411,5	426,4	390,6	Petcycle, franz. Mineralwasserhersteller, ISD, Lekkerland, Zentek, LEH (zum erheblichen Teil geschätzt)
Mengen aus der Direktentsorgung des Handels und großgewerblicher Anfallstellen	273,9	301,8	329,1	337,9	351,5	Hochrechnung auf der Basis von Angaben einzelner Handelshäuser; Mengen, die über o. g. Rücknahmesysteme abgewickelt werden, sind hier nicht berücksichtigt.
Insgesamt	2.332,2	2.377,1	2.433,1	2.461,6	2.514,3	

Tab. 2: Menge der gesammelten Verpackungen aufgeschlüsselt nach Jahr und Sammel-systemen [17, S. 93]

Qualität der Abfallfraktionen

Die Kunststoffabfälle fallen meistens, wie bei der Sammlung von Leichtverpackungen, als Gemisch an (Tabelle 2), wobei dieses Gemisch bei den dualen Systemen im Durchschnitt nur zu ca. 50 % aus Kunststoffen besteht (Abb. 9) [24, S. 140]. Über eine Sortierung müssen also zunächst die Kunststoffe, soweit sinnvoll, von den übrigen Verpackungsmaterialien getrennt werden, um dann nach Möglichkeit die jeweiligen Kunststoffsorten voneinander zu separieren, sodass sie einer entsprechenden Verwertung zugeführt werden können. Dabei eignet sich nur ein Teil der gesammelten Menge für die werkstoffliche Verwertung, da er nicht den Qualitätsanforderungen für eine Weiterverarbeitung entspricht. (siehe 4.1.1) Der Sortierrest gelangt üblicherweise in die thermische Verwertung. Werden inputbezogene Recyclingquoten berechnet, so wurde dieser Anteil bis Ende 2021 dennoch dem werkstofflichen Recycling zugeschrieben, was häufig zu Diskrepanzen in der Darstellung führt (siehe *Exkurs 1*). Einblick gibt Abb. 10, wonach nur ca. 50 % der dem Recycling zugeführten Kunststoffverpackungen werkstofflich genutzt werden bzw. der Rest verbrannt wird [17, S. 37]. Für andere Abfallfraktionen und -arten gilt ähnliches ([25, S. 53], [21, Anhang 29 z. B. S. 110], [26, S. 47 ff.]).

	Bau- abfälle	Gewerbe- abfälle	Sperr- müll	Elektroalt- geräte SLF	Altfahr- zeuge SLF	LVP
PE	20 %	25 %	50 %	0 %	6 %	7 %
PP	8 %	26 %	50 %	18 %	35 %	14 %
PVC	13 %	0 %	0 %	4 %	12 %	0,6 %
PS	3 %	0 %	0 %	0 %	0 %	5 %
EPS	12 %	4 %	0 %	0 %	0 %	3 %
PET	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	7 %
ABS	1 %	0 %	0 %	33 %	17 %	0 %
PA	1 %	0 %	0 %	3 %	7 %	0 %
HIPS	0 %	0 %	0 %	19 %	0 %	0 %
Folien LDPE	3 %	44 %	0 %	0 %	0 %	36 %
Folien PVC	39 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0,3 %
Folien PP	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	12 %
Sonstige, Gemisch	–	–	–	–	–	15 %
Nicht untersu- chungsrelevant	–	–	–	23 %	22 %	–

Tab. 3: Zusammensetzung der Abfallfraktionen inkl. der Shredderleichtfraktion (SLF) nach Kunststoffsorten (siehe Darstellung [26, S. 124])

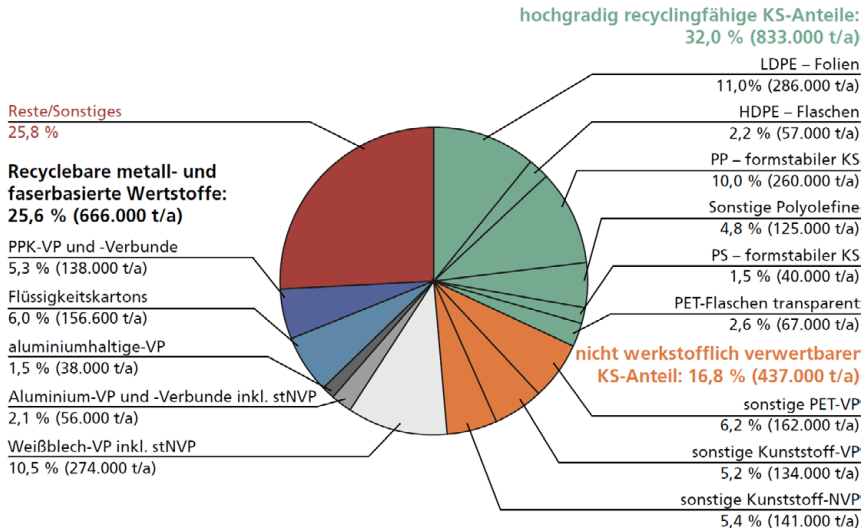


Abb. 9: Zusammensetzung DSD-Leichtverpackungen (LVP);
[24, S. 140 f. (Datenerhebung 2017)]

Die Ausbeuten nach der Sortierung sind dabei also begrenzt. Einen aktuelleren Überblick über die Ausbeute nach Sortierung gesammelter LVP-Abfälle zeigt Tabelle 3 [26]. Die restlichen Mengen einzelner Kunststofftypen gelangen in die sogenannten Mischkunststofffraktionen, die zumeist thermisch verwertet werden (Abb. 9).

Ausbeuten der sortierten Kunststofffraktionen Stoffstrom aus der LVP/WST-Sortierung	Ausbeute Produktfraktion bezogen auf den Polymeranteil im Input in Masseprozent (M.-%)
PE-Fraktion	52
PP-Fraktion	49
PS-Fraktion	48
PET-Fraktion	95
Folien-Fraktion (> DIN A4)	32

Tab. 4: Die Ausbeuten einzelner Kunststofffraktionen aus der LVP-Sortierung [26, S. 52 ff.]

Ausbeuten für andere Abfallströme finden sich bei Angaben über Zusammensetzung und Sortierausbeute in Dehne et al. [25] und Knappe et al. [26].

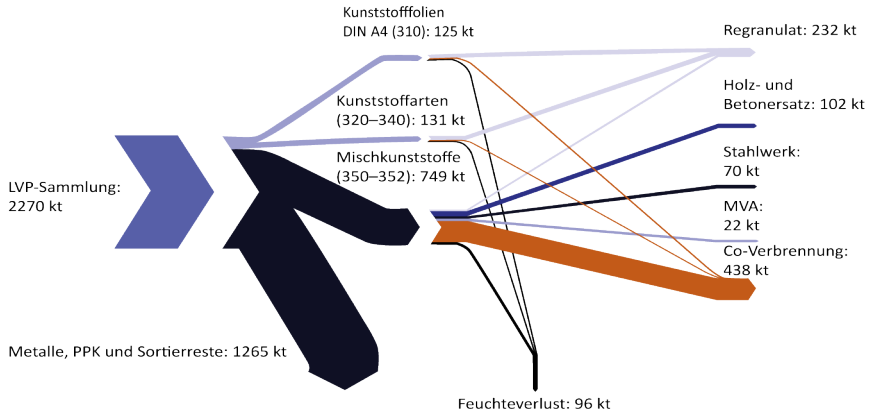


Abb. 10: Stoffströme aus der Verwertung von LVP [22]⁹

Besonders effizient hinsichtlich der Rezyklatausbeuten und der Sortenreinheit erweisen sich Rücknahmesysteme, wie beispielsweise das PET-Flaschen-Pfandsystem oder *Rewindo*, die Sammlung und Wiederverwertung von PVC-Fenstern. Je spezifischer gesammelt wird, desto mehr wird werkstofflich verwertet, was besonders bei bepfandeten Kunststoffflaschen bzw. Mehrwegprodukten auffällt (Abb. 38 [17, S. 199]).

Derartige pfandbewehrte Sammelsysteme führen zu einem nahezu sortenreinen Kunststoffabfall, der kaum sortiert werden muss. Durch die sortenreine Erfassung und dem nahezu sicheren Ausschluss von Kontaminationen kann mit einem verhältnismäßig geringem Aufwand Rezyklat in hoher, definierter Qualität (z. B. Lebensmittelqualität beim PET-Flaschenrecycling) gewonnen werden. Aus der Sammlung reiner Kunststoffabfälle können deutlich höhere Recyclingquoten als bei der Sammlung gemischter Kunststoffabfälle (LVP-Sammlung) erreicht werden. So beträgt die Ausbeute an rPET aus dem Pfandflaschenrecycling ohne großen Sortieraufwand bei 95,2 % [28, S. 26].

Bei Sammlung von PVC-Fensterabfällen über *Rewindo* konnten 85 % erreicht werden ([29, S. 4]). Der PVC-Bereich konnte deshalb in den letzten Jahren europaweit deutliche Zuwächse beim werkstofflichen Recycling verzeichnen (Abb. 11).

⁹ Die Zahlen in Klammern entsprechen den Bezeichnungen der DSD-Spezifikationen [27].

in kt	Einer Verwertung zugeführte Menge				
	Insgesamt	Inland			Ausland (werkstoffliche Verwertung)
		Werkstoffliche Verwertung von Materialien	Andere Formen der stofflichen Verwertung	Energetische Verwertung	
Duale Systeme	1.256,0	490,7	16,0	546,3	203,1
Branchenlösungen, sonstige Rücknahmesysteme, Eigenrücknahme	268,6	174,1	0,9	79,1	14,6
Korrektur wegen Überschneidung mit Aluminium-Verwertung	19,3	19,3	0,0	0,0	0,0
Verwertung von Mehrweg-Verpackungen (Verschlüsse, Kästen, Flaschen etc.)	228,3	159,1	0,0	57,1	12,1
Verwertung von bepfandeten Kunststoff-Einweg-Flaschen	390,6	377,7	0,0	8,1	4,8
Mengen aus der Direktentsorgung des Handels und großgewerblicher Anfallstellen	351,5	269,4	0,0	60,1	22,0
Insgesamt	2.514,3	1.490,3	16,8	750,6	256,6

Tab. 5: Werkstoffliche Verwertung von Verpackungsabfällen in Abhängigkeit vom Sammelsystem. Darstellung UBA [17, S. 99]

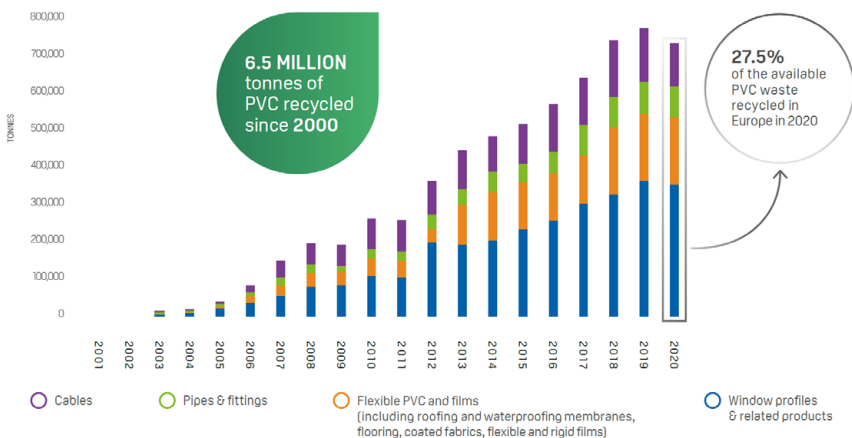


Abb. 11: Steigerung der Rezyklatausbeute im PVC-Bereich nach Anwendungen in der EU [30, S. 19]

Qualität der Sortierfraktionen – Kontaminationen

Bei den vorherrschenden, nicht stoffspezifischen Sammelsystemen kann jedoch der Eintrag von Kontaminationen nicht ausgeschlossen werden. Durch Fehl-
abwürfe, Produkthanftungen, biogene Anteile (Schimmel) oder sogar giftige
Produktreste müssen die gesammelten und sortierten Fraktionen im Anschluss
entsprechend gereinigt werden. Durch Migration von Störkomponenten
(Geruch, Gifte) sind die daraus erhaltenen Rezyklate trotz aufwändiger
Behandlung für viele Massenanwendungen (z. B. für den Lebensmittelkontakt)
zwangsläufig nicht zugelassen.

Eine Aufschlüsselung der Verpackungsabfälle nach Mengen und deren Verwen-
dungsmöglichkeit zeigt Tabelle 5. Nur 1/6 der Verpackungen (dies entspricht
dem PET-Flaschenrecycling) werden sortenrein erfasst und können auch
wieder im Lebensmittelbereich eingesetzt werden, was einem geschlossenen
Kreislauf im Sinne des Cradle-to-Cradle bzw. Circular-Economy-Prinzips ent-
spräche. Grob 5/6 der in den Verkehr gebrachten und eingesammelten Kunst-
stoffverpackungen (ohne Restmüll) können derzeit nicht wieder im Lebens-
mittelbereich eingesetzt werden.

Qualität der aus Rezyklaten hergestellten Produkte

Hinsichtlich Verwertung von Rezyklaten muss allgemein bedacht werden,
wie Störstoffe aus dem Recyclingmaterial das neu hergestellte Produkt oder
den Prozess der Herstellung beeinträchtigen. Pauschale Aussagen, die für alle
Anwendungen gelten, können hier nicht getroffen werden, da jedes Produkt
spezifische, z. T. gesetzlich geregelte Anforderungen und Spezifikationen erfül-
len und auch für den jeweiligen Verarbeitungsprozess geeignet sein muss. Die
Ausschleusung von Kontaminationen im Recyclingprozess ist jedoch grund-
sätzlich essentiell. Rezyklate müssen damit definierte und nachhaltig gesicherte
Eigenschaften aufweisen. Typische Kenngrößen für die Verarbeitbarkeit sind,
wie unter Abb. 4 schon angesprochen, das Schmelzverhalten (z. B. Abnahme
der Viskosität auf Grund alterungsbedingter verringerter Molmasse) oder die
Schmelzmasse-/Volumenfließrate, auch als Schmelzindex (MFI) bezeichnet.
Diese Größen sind entscheidend, welche Kunststoffprodukte in welcher Quali-
tät hergestellt werden können und wie schnell und sicher der Kunststoffver-

arbeitsprozess gewährleistet werden kann. Kunststoffhalbzeuge (Vorprodukte) oder -bauteile aus Rezyklaten weisen im Vergleich zu Virgin-Material unterschiedliche mechanische Eigenschaften auf. (Siehe Tabelle 6) auf. Durch diese und weitere Kenngrößen kann die Qualität des Produkts bestimmt werden [31].

Eigenschaft	Norm	R-PET amorph	ABS	R-PET	POM	PA66	PBT
E-Modul [MPa]	ISO 527	2500	2500	2800	2700	1100	2500
Zugfestigkeit [MPa]	ISO 527	55	44	75	65	50	55
Streckdehnung [%]	ISO 527	4	2,1	4	10	20	3,5
HOT/A [°C]	ISO 75	62	93	80	100	72	55
Dichte [g/m³]	ISO 1183	1,33	1,05	1,39	1,41	1,13	1,30
Schmelztemperatur [°C]	ISO 11357	247	–	255	166	260	223
Glasübergangstemp.[°C]	ISO 11357	78	105	85	-60	75	60

Tab. 6: Eigenschaftsvergleich¹⁰ von rPET mit technischen Kunststoffen¹¹ (grün für amorphe und blau für teilkristalline Kunststoffe) [32]

Je heterogener das Rezyklat durch Störstoffe, Kunststoffbestandteile und unterschiedliche Polymerbestandteilen verunreinigt ist, desto schwieriger wird es, neue Kunststoffprodukte mit spezifischen und hochleistungsfähigen Eigenschaften herzustellen. Als einfaches Einsatzgebiet bleibt häufig die viel zitierte „Parkbank“ (z. B. Holz- und Betonersatz in Abb. 10) und nicht die originäre Anwendung (siehe Kapitel 3.2.1).

Verbesserte Sortier- und Aufbereitungsprozesse können die Qualität der Rezyklate aus gemischten Kunststoffabfällen zwar erhöhen, jedoch muss dabei bedacht werden, dass zum einen damit gleichzeitig immer mehr Sortierreste anfallen (Qualität vs. Quantität) und zum anderen weitere Trennungsschritte für die Sortierreste technisch immer aufwendiger oder sogar unmöglich werden. Auch der Einsatz von Additiven kann die Bandbreite der Rezyklatanwendungen erweitern (z. B. Stabilisatoren, Compatibilizer, siehe Abschnitt 4.1.1), doch auch hier sind deutliche Grenzen gesetzt. Zudem muss bedacht werden,

10 Erläuterung der Eigenschaften: Der E-Modul charakterisiert die Steifigkeit und die Zugfestigkeit sowie die Streckgrenze charakterisieren die Festigkeit der Kunststoffe. HDT/A bedeutet Head Distorsion Temperatur (Verfahren A) und diese beschreibt die Wärmeformbeständigkeit.

11 Siehe DIN ISO 1043 Kunststoffe – Kennbuchstaben und Kurzzeichen [9].

dass auch die neu hinzugefügten Additive wieder in einen weiteren Kreislauf des Rezyklats gelangen und dort die Produkteigenschaften erneut beeinflussen.

In Tabelle 7 sind ausgewählte Eigenschaften von PP-Primärmaterial (Virgin) und Rezyklat gegenübergestellt. Der Anteil des Füllstoffs Talcum wird hier als definierend für ausgewählte Eigenschaften dargestellt.

Polypropylen – Beispiele					
PP	Virgin		Rezyklat		
Anteil Füllstoff	0 %	10–40 % Talcum	undefiniert, niedrig	20 % Talc.	40 % Talc.
MFI (2.16 kg bei 230°C), g/10 min			6	9	5
Dichte (g/cm ³)	0.9–0.91	0.97–1.25	0.93	1.09	1.22
Reißfestigkeit (MPa)	20–35	21–28	19.6	23	25
Schlagzähigkeit (kJ/m ²)			11.9	10	5
Feuchtigkeit (%)	0.01–0.1	0.01–0.03			0.19
Bruchdehnung (%)	200–500	20–30	33	25	

Tab. 7: Beispielhafter Vergleich Virgin-Material und Rezyklat PP [33, S. 603 ff.]

Zeitliche Qualitätsaspekte

Des Weiteren können sich die technischen Rahmenbedingungen aufgrund geänderter Stoffströme oder geänderter Spezifikationen ändern. Als Negativbeispiel kann hier das Vinyloop-Verfahren [34] zum solvolytischen Recycling von PVC genannt werden. Alt-PVC-Verbundmaterialien enthalten in der Regel Weichmacher wie DEHP, welches laut REACH-Verordnung wegen seiner fruchtschädigenden Wirkung seit dem 21. Februar 2015 nicht mehr in Produkten für den europäischen Markt enthalten sein darf (Europäische Chemikalienagentur (ECHA)). Das Verfahren konnte diese Weichmacher nicht im ausreichenden Maß mit einem vertretbaren Aufwand vom Rezyklat abtrennen, sodass die Recyclinganlage abgestellt werden musste [35, S. 15407].

Insbesondere bei Materialien, die eine sehr lange Zeit im Gebrauch sind (Fahrzeuge, Bauwesen), kann es deswegen zu unplanbaren Komplikationen kom-

men, da zum Zeitpunkt der Primärprodukterzeugung die Anforderungen für Rezyklate in einem langfristigen Zeitraum unbekannt sind.

Zwischenfazit:

In Summe bedeutet dies, dass aus sehr spezifischen Kunststoffen allenfalls ein letztlich gemischtes Rezyklat hergestellt werden kann. Dieses Rezyklat eignet sich häufig nicht, im originalen Einsatzbereich wiederverwendet zu werden. Ein offener Recyclingprozess, manchmal auch als Downcycling bezeichnet, liegt vor. Soll ein möglichst geschlossener Recyclingkreislauf (cradle-to-cradle) ermöglicht werden, wäre idealerweise eine Wiederverwendung der daraus resultierenden Abfälle in genau demselben Einsatzgebiet mit dem gleichen Anforderungsprofil sinnvoll, da nur die alterungsbedingten Effekte durch Neuware kompensiert werden müssten. Auch die Ausschleusung von Kontaminationen ist für eine möglichst hochwertige Verwendung essentiell.

4.1.3 Grundlegende rechtliche Rahmenbedingungen

Die zukünftige Ausrichtung der Gesetzgebung für das Inverkehrbringen und Verwerten von Kunststoffen gründet sich auf die *Europäische Strategie für Kunststoffe in der Kreislaufwirtschaft* von 2018.¹² Hier sind die folgenden Schwerpunkte festgelegt:

- Kunststoffabfälle vermeiden, insbesondere durch den Einsatz von wiederverwendungsfähigen Verpackungen mit einem längeren Lebenszyklus, durch geringeres Gewicht der Verpackungen sowie über die Substitution von Kunststoffen durch andere Materialien (z. B. Holz, Papier, Aluminium, bio-basierte Materialien), wenn sie eine höhere Wiederverwendungsquote bzw. einen längeren Lebenszyklus haben und die Substituierung wirtschaftlich effizienter und ökologischer ist,
- kreislauffreundliches Produktdesigns durchzusetzen,
- quantitative und qualitative Erweiterung der Recyclingkapazitäten durch moderne Technologien für Sammlung, Sortierung und Recycling,
- bessere Abfalltrennung,

¹² <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TEXT/?uri=CELEX%3A52018DC0028> (Zugriff 26.04.2022)

- signifikante Erhöhung der Vorgaben für Recyclingquoten von Kunststoffen, differenziert nach spezifischen Verpackungsabfallströme aus Haushalten, Gewerbe und Industrie sowie Abfälle aus Verbundverpackungen,
- Priorisierung der stofflichen vor der thermischen Verwertung und Durchsetzung realistischerer Berechnungsmethoden für Recyclingquoten, die eine Anrechnung sämtlicher energetisch verwerteter Kunststoffabfälle ausschließen,
- Etablierung eines „Regimes der erweiterten Herstellerverantwortung“ für Inverkehrbringer von Kunststoffverpackungen im Hinblick auf die Erhöhung von Recyclingquoten und die Verwendung von Rezyklaten,
- schrittweise Einstellung der Ausfuhr schlecht sortierter Kunststoffabfälle aus der EU,
- Etablierung einer engen Zusammenarbeit der Abfallwirtschaft mit der chemischen Industrie zur Verbesserung der Recyclingfähigkeit sowie bei der Verwertung von Kunststoffen,
- Verringerung der Abhängigkeit der EU von der Einfuhr fossiler Rohstoffe zur Kunststoffherstellung, Senkung der CO₂-Emissionen und Förderung von Innovationen, die diesen Zwecken dienen.

Auf dieser Grundlage wurde im Rahmen einer EU-weiten Selbstverpflichtungskampagne das ambitionierte Ziel formuliert, dass bis 2030 z. B. alle Kunststoffverpackungen recyclingfähig werden sollen und 55 % aller Kunststoffe tatsächlich zu recyceln sind.

Diese grundlegenden Entscheidungen sind die Basis für die einzelnen gesetzlichen Regelungen in Deutschland im Hinblick auf Herstellung, Nutzung und Verwertung von Kunststoffen im Bereich des Chemikalien-, Lebensmittel-, Produkt- und Abfallrechts. Im Einzelnen sind dies die wesentlichen rechtlichen Rahmenbedingungen:

- das **Kreislaufwirtschaftsgesetz** (KrWG), das nicht nur Ressourcenschonung durch die Aufarbeitung und Wiederverwendung von Abfällen fördert und fordert, sondern mit seiner Definition von Abfall- und Produkteigenschaft (§§ 4, 5), mit der Verwertungshierarchie (§ 8) und dem Gebot der getrennten Sammlung und Behandlung (§ 9) erhebliche Konsequenzen für die Akteure in der Verwertungskette von Kunststoffen zur Folge hat (Produkt- und Abfallrecht).

- die Behandlung von Rezyklaten in der **REACH-Verordnung** und die damit verbundenen Informationspflichten für die Hersteller sowie die Probleme bei der Umsetzung der „Leitlinien zu Abfall und zurückgewonnenen Stoffen“ der Europäischen Chemikalienagentur (ECHA) von 2010 (Chemikalienrecht; näheres dazu ab S. 43 im Zusammenhang mit den EU-Verordnungen 282/2008 und 10/2011)
- die Anforderungen für die sogen. Lebensmittelbedarfsgegenstände aus recyceltem Kunststoff lt. **EU-Verordnung EG Nr. 282/2008** (Lebensmittelrecht)
- die „**EU-Verordnung 10/2011** über Materialien und Gegenstände aus Kunststoff, die dazu bestimmt sind, mit Lebensmitteln in Berührung zu kommen“ (nebst der Novellen 2019/37 und 1245/2020)
- die „**EU-Richtlinie 2019/904** über die Verringerung der Auswirkungen bestimmter Kunststoffprodukte auf die Umwelt (Einweg-Kunststoff-Richtlinie)“, ¹³
- das neue **Verpackungsgesetz** (VerpackG) vom 09. Juni 2021
- ferner: die „Verordnung über die Vergabe öffentlicher Aufträge (VgV)“ in der Fassung vom 9.6.2021 sowie die „Unterschwelvenvergabeordnung (UVgO)“ vom 2.7.2017.

Insgesamt erhöht sich mit den bereits aktuell geltenden und künftig zu erwartenden Gesetzespaketen und Verordnungen nicht nur der Zwang, quantitativ weit mehr Kunststoffe einer stofflichen Verwertung zuzuführen. Gefordert wird auch, die Rezyklate in wesentlicher höherer Qualität herzustellen, also mögliche besorgniserregende Chemikalien und sonstige Kontaminierungen zu vermeiden oder zu eliminieren und eine undefinierte chemische Zusammensetzung recycelter Kunststoffe und deren unklare Eignung für vorgesehene Verwendungen präventiv zu verhindern.

Zugleich erhöhen sich für die Akteure auf den einzelnen Stufen der Kunststoffabfallverwertung aber auch die formalrechtlichen Anforderungen und die Dokumentations- und Meldepflichten sowie die damit verbundenen Kosten bei Herstellung, Vertrieb und Einsatz von Rezyklaten.

¹³ Richtlinie (EU) 2019/904 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 5. Juni 2019 über die Verringerung der Auswirkungen bestimmter Kunststoffprodukte auf die Umwelt, ABl. L 155 vom 12.6.2019, S. 1.

Die rechtlichen Rahmenbedingungen des Kunststoffrecyclings müssen letztlich verschiedenen, z. T. gegensätzlichen **Interessenlagen** gerecht werden:

- a. zunächst den wirtschaftlichen Interessen der Rezyklatanbieter und -anwender,
- b. den Umsatzinteressen der Hersteller von Neuware, die am Markt auch als Mitwettbewerber gegenüber den Rezyklatanbietern agieren, zugleich jedoch die Ausgangsrohstoffe für die Rezyklatherstellung liefern;
- c. dem übergeordneten Interesse der Gesellschaft nach Energie- und Rohstoffeffizienz sowie CO₂-Reduktion;
- d. den Interessen der Verbraucher nach funktionalen und zugleich gesundheitlich unbedenklichen sowie bezahlbaren Produkten;
- e. den Interessen der Energiewirtschaft, die ca. 3 Mio. t/a heizwertreiche Kunststoffabfälle in 67 Müllverbrennungsanlagen (MVA), 33 EBS-Kraftwerken und 36 Zementwerken in Deutschland energetisch mitverwertet; [36, S. 19 f., 24 f., 41, 69].
- f. dem alles überlagernden Wirtschaftlichkeitsprinzip, wonach jede Stufe des Stoffkreislaufes und jeder Verwertungspfad nur funktionieren kann, wenn eine kostendeckende Produktion mit Gewinnaussichten möglich ist.

Je nach Interessenslage fallen auch die Bewertungen einzelner Regelungen in den genannten Gesetzen unterschiedlich aus. Nachfolgend werden ausgewählte gesetzliche Rahmenbedingungen beschrieben, die sich unmittelbar oder mittelbar auf die Kunststoffabfallverwertung, auf die Rezyklatqualitäten und die Rezyklateinsatzquote auswirken:

Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG)

Die Veränderungen in der Novelle des KrWG vom 10. August 2021 zeigen den Trend, wohin sich die Abfallwirtschaft im Allgemeinen und das Kunststoffrecycling im Besonderen entwickeln. Die Reaktionen von Umwelt- und Verbraucherverbänden auf die Novelle einerseits und die der Branchenakteure andererseits machen aber auch deutlich, dass die Zielkonflikte Wirtschaftlichkeit/Ökologie sowie freiwillige Selbstkontrolle der Branche/regulatorische Auflagen fortbestehen.

Für das Kunststoffrecycling ist u. a. **§ 5 „Beendigung der Abfalleigenschaft“** elementar.¹⁴ Vorbehaltlich der Priorisierung der stofflichen vor der thermischen Verwertung (§ 2) ist zwar ein aus Kunststoffabfällen hergestellter Ersatzbrennstoff noch immer ein verwertbares Recyclingprodukt, aber im erweiterten Abs. 2 wird der Gesetzgeber jetzt ermächtigt, per Verordnung weitere Vorgaben für eine „umsichtige, sparsame und effiziente Verwendung der natürlichen Ressourcen (zu) ermöglichen.“¹⁵ So können

1. Abfälle von der Verwertung ausgeschlossen oder zur Verwertung verpflichtet werden,
2. Behandlungsverfahren und -methoden ausgeschlossen oder einer Zulassung unterworfen werden,
3. Qualitätskriterien für die Rezyklate im Hinblick auf Schadstoffgrenzwerte festgelegt werden
4. Anforderungen an Managementsysteme vorgegeben werden, mit denen die Einhaltung der Kriterien für das Ende der Abfalleigenschaft nachgewiesen wird, einschließlich der Anforderungen an die Qualitätskontrolle, an die Eigenüberwachung und an eine Akkreditierung oder sonstige Form der Fremdüberwachung der Managementsysteme,
5. Konformitätserklärungen eingefordert werden.

Da es derartige Verordnungen z. T. zwar auf EU-Ebene, aber noch nicht auf Bundesebene gibt, sind diese rechtlichen Möglichkeiten für eine Förderung des Kunststoffrecyclings unverbindlich und in der Praxis daher faktisch ohne Bedeutung, solange keine weitergehenden, verbindlichen Bestimmungen erlassen oder Anreize geschaffen werden, Rezyklate anstelle von Neuware einzusetzen sowie die energetische Verwertung unattraktiver zu machen. So fordert die

14 Abfälle dürfen als solche nicht wieder in Verkehr gebracht werden. Um rechtlich zu einem verkehrsfähigen Produkt zu werden, bedarf es der Erfüllung der folgenden Kriterien:

1. Der Abfall wird üblicherweise für bestimmte Zwecke verwendet,
2. es besteht ein Markt für ihn oder eine Nachfrage nach ihm,
3. er erfüllt alle für seine jeweilige Zweckbestimmung geltenden technischen Anforderungen sowie alle Rechtsvorschriften und anwendbaren Normen für Erzeugnisse sowie
4. seine Verwendung führt nicht zu schädlichen Auswirkungen auf Mensch oder Umwelt.

Die Entlassung aus der Abfalleigenschaft ist zunächst ein technisches sowie ein Nachfrageproblem, zugleich aber mit einem vergleichsweise aufwendigen formaljuristischen Akt verbunden. Da Abfall nicht verschwinden, sondern nur in ein Produkt umgewandelt oder abschließend entsorgt werden darf, muss die Entlassung aus der Abfalleigenschaft unter Nachweis der Einhaltung der genannten 4 Kriterien dokumentiert und bei der zuständigen Umweltbehörde angezeigt werden. Für die Promotion von Rezyklaten ist es jedoch nicht ausreichend, wenn den Formalien genüge getan und die Kunststoffe dann aber z. B. zu dem Produkt Ersatzbrennstoff werden.

15 Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG), Stand: 10. August 2021, siehe www.gesetze-im-internet.de (Zugriff 26.03.2022)

Entsorgungswirtschaft die Regierungskoalition auf, „... die bereits existierende Verordnungsermächtigung im Kreislaufwirtschaftsgesetz nun endlich (zu) nutzen und schnellstmöglich Abfallende-Verordnungen zu relevanten Stoffströmen (zu) erlassen.“ [37]

Zwar enthält die **Anlage 5 des KrWG** dafür beispielhafte – auch zukunftsweisende – Empfehlungen, mit welchen systemischen Maßnahmen die Zielstellungen des KrWG umgesetzt werden können. Zu den Empfehlungen gehören u. a.

- verursacherbezogene Gebührensysteme einführen bzw. erweitern, die Anreize für die getrennte Sammlung recycelbarer Abfälle und für die Verringerung gemischter Abfälle schaffen sollen,
- die Erweiterung des Pfandsystems,
- ein auf Nachhaltigkeit ausgerichtetes öffentliches Beschaffungswesen zur Förderung des Einsatzes von recycelten Erzeugnissen, Materialien und Stoffen,
- der Einsatz steuerlicher Maßnahmen oder anderer Mittel zur Förderung des Absatzes von rezyklatbasierten Erzeugnissen,
- die Förderung von Forschung und Innovation im Bereich moderner Recycling- und Generalüberholungstechnologien.

Da es sich jedoch um allgemein gehaltene, unverbindliche Empfehlungen handelt, bleibt die Lenkungswirkung in Bezug auf den Status quo im Kunststoffrecycling offen.

Im Hinblick auf einen möglichst hohen Reinheitsgrad bei der Sammlung der einzelnen Abfallfraktionen präferiert das KrWG möglichst getrennte **Sammelsysteme** (§ 9 und § 20, Abs. 2.2). Zugleich werden aber auch Kriterien fixiert, nach denen die öffentlich-rechtlichen Entsorgungsträger im Zusammenwirken mit den Entsorgungsunternehmen auf andere Systeme wie z. B. die einheitliche Wertstofftonne oder ein vergleichbares einheitliches Wertstoff Erfassungsmodell abstellen können, wo das *Vermischungsverbot* aufgehoben wird. Als Kriterien dafür werden unter anderem genannt:

- Das Potenzial zur Vorbereitung zur Wiederverwendung, zum Recycling oder zu sonstigen Verwertungsverfahren muss in einer vergleichbaren Qualität wie mit einer getrennten Sammlung erreicht werden.
- Die getrennte Sammlung ist unter Berücksichtigung guter Praxis der Abfallsammlung technisch nicht möglich oder mit zu hohen Kosten verbunden.

Dieser Entscheidungsspielraum hat zunächst den Vorteil, dass verschiedene systemische Ansätze – Hol-/Bringsystem, Getrenntsammlung (Gelbe Tonne), vertiefte Getrenntsammlung (mehrere materialspezifische Wertstofftonnen) oder einheitliche Abfalltonne – an lokale oder regionale Gegebenheiten angepasst und zugleich wettbewerblich auf ihre Eignung geprüft und evaluiert werden können. Andererseits sind die genannten Kriterien weit auslegbar und nicht mit messbaren Parametern untersetzt, so dass oftmals nur Kostenvorteile und nicht Qualitäts- oder ökologische Ansprüche bei der Wertstofftrennung den Ausschlag für die Vergabe der Entsorgungsaufträge geben. Dies ist als Tendenz vor allem dort zu beobachten, wo die Träger der Sammelsysteme von den nachfolgenden Prozessen der Abfallbehandlung und -verwertung abgekoppelt sind.¹⁶

Ein großer Fortschritt ist vom Ansatz her auch die Novellierung von § 45 KrWG. Hier wird für die **öffentliche Auftragsvergabe** die bisherige Prüfpflicht zu einer Bevorzugungspflicht von Recyclingprodukten aufgewertet. So will der Gesetzgeber die Beschaffung von rezyklathaltigen und vorzugsweise PCR-haltigen Kunststoffprodukten fördern. Diese müssen nun anderen Produkten vorgezogen werden. – Sofern sie eine gleichwertige Qualität und Funktionalität im Hinblick auf den vorgesehenen Einsatzzweck haben und keine unzumutbaren Mehrkosten entstehen. Eine solche Einschränkung befördert nach Auffassung von Umweltverbänden¹⁷ und Anbietern PCR-haltiger Produkte [39] allerdings das Beharren auf den herkömmlichen, eingespielten Beschaffungswegen.

Hinzu kommt, dass der PCR-Gehalt von Produkten gar nicht analytisch ermittelt werden kann, da es bislang keinen anerkannten chemischen oder physikalischen Nachweis für den Rezyklatgehalt in Kunststoffprodukten gibt. Somit existieren auch noch keine entsprechenden standardisierten Berichts- oder Nachweispflichten zum PCR-Gehalt in Kunststoffprodukten. Der Nachweis

16 Diese Tendenz wurde bereits in früheren Studien festgestellt [8, S. 130f.]. Als Erklärung wurde die Trennung von Sammlung und Abfallverkauf zur Verwertung genannt. Die Folge ist, dass mit dem Verkauf von Abfällen oder Sortierfraktionen das Risiko schädlicher Inhaltsstoffe für den Käufer/Rezyklathersteller zu hohen Preisabschlägen und/oder hohen Aufwendungen für Materialanalysen führt. So sind die Preise faktisch das Hauptkriterium des Handelsvertrages. Hinzu kommt, dass in den Ausschreibungen für regionale Entsorgungsaufträge zumeist die Kosten der Abfallerfassung das Hauptkriterium darstellen. Die rechtliche Ausdehnung der Produktverantwortung in den vergangenen Jahren befördert allerdings die Gegen Tendenz, dass z. B. große Handelsketten wie die Schwarz-Gruppe ihre eigenen internen Kreislaufsysteme etablieren, wo über alle Verarbeitungsstufen – beginnend mit dem D4R – Transparenz hinsichtlich der Abfallqualität zwingend ist.

17 So hat z. B. der NABU e. V. seine Forderung, die genannten Einschränkungen im § 45 KrWG zu streichen, nicht durchsetzen können [38, S. 14].

kann derzeit nur indirekt über die schriftliche Dokumentation der Herkunft der verschiedenen Input-Ströme (Massenbilanzen) erfolgen [40, S. 13]. Auch gibt es bislang „... keine rechtlich verbindlichen Anforderungen, die festschreiben, dass der PCR-Gehalt von Produkten in einem Produktdatenblatt aufgeführt sein muss. Nur die Produkthersteller und deren Lieferanten verfügen über die zur Erstellung der Massenbilanzen erforderlichen Informationen. Insofern beruhen Angaben zum Rezyklatgehalt auf Eigenerklärungen, bspw. als freiwillige Eintragung in herstellereigenen Produktinformationen oder Werbematerialien“ [40, S. 13].

Nicht zuletzt ist in den Ausschreibungen selbst ein allgemeines Eignungskriterium „PCR-Verwendung“ nicht möglich. Der PCR-Einsatz kann stets nur als Anforderung an das konkret ausgeschriebene Produkt bestimmt werden. Die Vergabestelle muss dafür insbesondere das Kriterium „Verbindung mit dem Auftragsgegenstand“ prüfen und darf nicht ohne Weiteres allgemeine Anforderungen, z. B. zum PCR-Einsatz im gesamten Betrieb, stellen [40, S. 13]. Um dieses rechtliche Defizit zu beheben, müssten erst die relevanten allgemeinen Verfahrensregelungen im Vergaberecht angepasst werden.

Diese offensichtlichen Lücken bei den allgemeinen Verfahrensregelungen im Hinblick auf die Förderung des Rezyklateinsatzes durch die öffentliche Hand werden im Vergaberecht dadurch verstärkt, dass die Bevorzugungspflicht gem. § 45 KrWG weder in der „Verordnung über die Vergabe öffentlicher Aufträge (VgV)“ in der Fassung vom 9.6.2021 sowie in der „Unterschwelvenvergabeordnung (UVgO)“ vom 2.7.2017 adäquat umgesetzt ist. Hier bleibt es letztlich den Vergabestellen überlassen, ob sie Kriterien im Sinne der Förderung von rezyklathaltigen Produkten in ihre Ausschreibungen aufnehmen oder nicht. Die Vergabestelle hat natürlich die Möglichkeit, bei der Ausschreibung und der Bewertung der Angebote z. B. auch den PCR-Gehalt in die Bewertungsmatrix aufzunehmen, aber sie muss es nicht. Weder in der VgV noch in der UVgO ist ein direkter Verweis auf die Bestimmungen des § 45 KrWG enthalten. Potenzielle Bewerber müssen also von sich aus die Bevorzugungspflicht geltend machen und den Nachweis über eine der Neuware vergleichbaren Qualität bei gleichen oder niedrigeren Kosten ihrer rezyklatbasierten Angebote erbringen. Die Verbände der Recyclingwirtschaft sowie Umweltverbände sehen hier einen Nachbesserungsbedarf seitens der Politik [39].

Exkurs 2

Untersuchung zur Umsetzung von § 45 KrWG

Interessant wäre in diesem Zusammenhang eine exemplarische wissenschaftliche Untersuchung durchzuführen, ob die Ausschreibungskriterien gem. § 45 KrWG in der Praxis der öffentlichen Auftragsvergabe eine relevante Rolle spielen, z. B. auf der Ebene von Bundes- oder Landesbehörden; ob in den Ausschreibungen seit der KrWG-Novelle tatsächlich auf die Bevorzugungspflicht gem. § 45 KrWG hingewiesen wurde und wie oft im Endeffekt ein Zuschlag auf Basis dieser Bevorzugungspflicht erfolgt ist bzw. wie oft mit Bezug auf die in Abs. 2 des § 45 aufgeführten Ablehnungsgründe von der Bevorzugungspflicht abgewichen wurde. (Genannte mögliche Gründe: Nichteignung der Rezyklate, unzumutbare Mehrkosten, kein ausreichender Wettbewerb, entgegenstehende Rechtsvorschriften, z. B. Lebensmittelverpackungsgesetz).

Anzumerken ist der gesamte **Teil 4 des KrWG**, in dem die Ermächtigung des Gesetzgebers analog § 5 Abs. 2 in den Details präzisiert wird. Mittels Verordnung können restriktive Maßnahmen umgesetzt werden, die an allen Punkten des Stoffkreislaufes ansetzen, um die Rezyklatqualität zu erhöhen, den Einsatz von Rezyklaten zu fördern und die Produktverantwortung der Hersteller und Inverkehrbringer zu erhöhen (Rücknahmeverpflichtungen, hochqualitative Verwertungspflicht, Dokumentationspflichten, finanzielle Gewährleistung etc.). Umwelt- und Verbraucherverbände mahnen auch hier an, dass die zuständigen Institutionen und Behörden von diesen Möglichkeiten zu wenig Gebrauch machen. So fordert bspw. der *vzbv Verbraucherzentrale Bundesverband e. V.* eine erweiterte Herstellerverantwortung mit Übernahme der Entsorgungskosten für Einweg-Behältnisse [41] oder der *NABU e. V.* eine verbindliche Rezyklateinsatzquote für Kunststoffe in Verpackungen von 25 % bei einer gleichzeitigen Abgabe auf den eingesetzten Primärmaterialanteil [42]. Unabhängig von der politischen Durchsetzbarkeit wären dies exemplarische Steuerungsinstrumente, die auf dem Verordnungsweg mit Bezug auf das KrWG konkret umgesetzt werden könnten.

Hervorzuheben sind weiterhin die präzisierten Zielvorgaben für **Recyclingquoten** im **§ 14 KrWG** auf Grundlage der Festlegungen in der *Europäischen Strategie für Kunststoffe in der Kreislaufwirtschaft* von 2018. So sind ab 1. Januar 2025 insgesamt mindestens 55 Gewichts- % der Siedlungsabfälle zu recyceln.

Die Quote soll bis 2035 auf 65 % steigen. Da gem. § 25 die thermische Verwertung nicht unter Recycling fällt, bedeutet diese Vorgabe, z. B. angesichts einer aktuellen Quote von rd. 11 % für das werkstoffliche Kunststoffrecycling aus PCA, dass diese Zielgrößen richtig sind, aber auch eine große Herausforderung für die Kreislaufwirtschaft darstellen.

„EU-Verordnung 10/2011 über Materialien und Gegenstände aus Kunststoff, die dazu bestimmt sind, mit Lebensmitteln in Berührung zu kommen“ i. V. m. EU-Verordnung EG 282/2008 zu Recyclingkunststoffen

Ist nach dem Recycling die Abfalleigenschaft beendet, greifen – gemäß § 7a VerPackG für die Verwendung der Rezyklate – die geltenden Anforderungen des Chemikalien- und Produktrechts. Dies sind in der Regel die übergreifende REACH-Verordnung und insbesondere für Lebensmittelverpackungen die *EU-Verordnung 10/2011* (ergänzt durch die *EU-Verordnung 2020/1245*) in Verbindung mit der *EU-Verordnung 282/2008* zum Umgang mit Rezyklaten bei Lebensmittelverpackungen. Für die Hersteller und Anwender von Rezyklaten bilden diese beiden Verordnungen, wie schon beschrieben, eine große technische Herausforderung, die zudem mit einem hohen Aufwand an Konformitätsnachweisen verbunden ist.

Zwar sind Kunststoffabfälle von der Pflicht zur Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung chemischer Stoffe gemäß REACH-Verordnung und von der CLP-Verordnung (Classification, Labelling and Packaging) zur Einstufung, Kennzeichnung und Verpackung von Stoffen und Gemischen ausgenommen, da die sortierten Wertstofffraktionen überwiegend aus bereits zugelassenen Stoffen bestehen. Bei der Prüfung, ob Abfälle oder Abfallbestandteile gefährliche Inhaltsstoffe enthalten, muss gleichwohl auf Gefährlichkeitsmerkmale abgestellt werden, die sich aus dem Stoffrecht ableiten. Bei Lebensmittelverpackungen sind die Anforderungen des Stoffrechts über die beiden o.g. EU-Verordnungen geregelt.

Die unmittelbare Anwendung von Vorschriften des Stoff- bzw. Chemikalienrechts auf die Kontrolle und Steuerung der Herstellung von Kunststoffzeugnissen birgt für Hersteller von Rezyklaten zwei grundlegende Gefahren in sich: a) dass Sortierfraktionen, die aus chemisch-analytischer Sicht stofflich durch-

aus noch für die Aufarbeitung zu Rezyklaten geeignet sind, vorsorglich einer thermischen Verwertung zugeführt werden, weil die Besorgnis besteht, dass ein unter Einsatz von Rezyklaten hergestelltes Produkt dem Stoffrecht nicht genügt. Oder b) dass Anwender die Rezyklate vom Hersteller wegen Kontaminationen oder Minderqualitäten nicht abnehmen, Preisabschläge geltend machen bzw. Produkthaftungen durchleiten.

Hersteller von Rezyklaten aus Lebensmittelverpackungen stehen daher immer von Neuem vor der Entscheidung, sich den Anforderungen der Verordnungen zu unterwerfen und alle Betriebsprozesse rechtskonform zu gestalten, wenn die Rezyklate wieder für Lebensmittelverpackungen verarbeitet werden sollen. Das heißt im Einzelnen:

- Kunststoffrezyklate dürfen keinen direkten Kontakt zu Lebensmitteln haben, es sei denn, sie sind über Recyclingverfahren gewonnen worden, die von der EFSA (European Food Safety Authority) einer Sicherheitsbewertung unterzogen und von der EU-Kommission zugelassen sowie in ein entsprechendes Register der zugelassenen Verfahren aufgenommen worden, oder
- die Rezyklate sind in den Verpackungsbehältern oder -folien hinter einer funktionalen Sperrschicht verarbeitet, die sicher und überprüfbar eine Migration von Inhaltsstoffen auf die Lebensmittel über die gesetzliche Grenze von 10 mg/dm² Kontaktfläche hinaus verhindert und selbst aus einem zugelassenen Kunststoff besteht.¹⁸

Die alternative Entscheidung seitens der Rezyklathersteller wäre, mit weniger Aufwand und Risiken Rezyklate für andere Marktsegmente mit geringeren Ansprüchen herzustellen oder gar den Weg der thermischen Verwertung zu nehmen.

In Summe bedeutet dies für das Recycling von Lebensmittelverpackungen, dass die Rezyklatqualität faktisch der von für Lebensmittel zugelassenen Neeware-Qualität entsprechen muss.

Für die Rezyklathersteller hat dies erhebliche **Konsequenzen**, wenn sie im Marktsegment der hochpreisigen, lebensmittelgerechten Qualitäten agieren wollen:

¹⁸ Verordnung (EG) Nr. 282/2008 Der Kommission vom 27. März 2008, Pkt. (8)ff. In: Amtsblatt der Europäischen Union vom 28.03.2008, S. L 86/10. Siehe auch Verordnung (EG) Nr. 10/2011 Der Kommission vom 14. Januar 2011. In: Amtsblatt der Europäischen Union vom 15.01.2011, S. L 12/4 f. (Abs. 27)

- Die Nachfrage nach hochwertigen Abfallchargen übersteigt das Angebot. Das treibt deren Einkaufspreise in die Höhe und verschlechtert die Konkurrenzsituation gegenüber den Anbietern von virgin materials. (Nutznießer dieser Situation ist nicht zuletzt der Handel, für den z. B. die Ballenware aus PET-Einwegflaschen kein durchlaufender Posten, sondern ein gewinnbringender Geschäftszweig ist.)
- Der Aufwand zur Erreichung einer annähernden Neuwarequalität führt bei der Abfallbehandlung zu einer höheren Abscheidungsquote von Störstoffen und Minderqualitäten. So benötigt der Rezyklathersteller und -verarbeiter ALPLA nach eigenen Aussagen bspw. bis zu 2 t Ballenware aus PET-Gebinden, um 1 t PET-Granulat in Lebensmittelqualität herstellen zu können. Trotz höherer Preise für PET-Neuware gegenüber qualitativ fast gleichwertigem rPET sind im Saldo die Gesteungskosten für eine rPET-Flasche bis zu 50 % höher als die einer PET-Flasche aus virgin material.¹⁹ Hinzu kommt das Risiko unentdeckter Kontaminationen und dass die ausgesonderte Minderqualität nicht kostendeckend für den gesamten Recyclingprozess äußert werden kann. Alle bekannten Lebenszyklusanalysen (LCA) und Ökobilanzen belegen jedoch, dass rPET-Produkte einen nachweislich besseren CO₂-Fußabdruck als vergleichbare Produkte aus PET-Neuware haben.²⁰ Die Marktpreise bilden diesen ökologischen Vorteil jedoch i. d. R. nicht ab.

Zu den Wegen der Rezyklathersteller, um den hohen Standards des Stoff- und des Lebensmittelrechts gerecht werden zu können und die EU-Zulassung der Verwertungsverfahren zu erreichen, gehören:

19 Angaben aus einem Nachfolgegespräch mit ALPLA in Auswertung der Befragung von Branchenakteuren.

20 Z. B.: [43], [44] Die bis dato ausführlichsten vergleichenden LCA-Untersuchungen hat das österreichische Institut *c7-consult* durchgeführt. Den Gutachtern lagen noch unveröffentlichte Ökobilanzen u. a. für Mineralwasser-Flaschen aus PET und Glas sowie für Milchverpackungen in Deutschland vor. Die Methodik des Instituts orientiert sich an der DIN EN ISO 14040/44 zur Ökobilanzierung, geht aber noch darüber hinaus. So werden sämtliche Produktionsschritte zur Herstellung der Flaschen bis hin zum Schraubverschluss und den Etiketten, separat für verschiedene Flaschengrößen, bewertet (Produktion der Materialien, benötigte Energie und Treibstoffe, Transportentfernungen, Abfüllung, Waschen, Distribution, Recycling, Entsorgung von Reststoffen). Zudem werden faktisch alle direkten und indirekten umweltrelevanten Wirkungsfaktoren bei der Herstellung und dem Recycling bis zur neuen Flasche verifiziert (akkumulierte CO₂-Äquivalente, Versauerungspotenzial des Bodens/SO₂-Äquivalente, Sommersmog/Ethylen-Äquivalente, terrestrische Eutrophierung, aquatische Eutrophierung Frisch- sowie Meerwasser/P-+N-Äquivalent, Landverbrauch, Feinstaub-Potenzial, Wasserverbrauch, Verbrauch mineralischer Rohstoffe, kumulierter Energieaufwand unterschieden nach KEA, erneuerbar und nicht erneuerbar). Verglichen wurden jeweils 13 bzw. 5 vergleichbare Handelsprodukte. Die Ergebnisse bei den Mineralwasserflaschen: Mehrwegflaschen aus PET schneiden über alle Umweltwirkungen hinweg am besten ab, PET-Mehrweg ist etwas ökologischer als Glas-Mehrweg, je höher der Anteil an rPET umso größer der ökologische Vorteil, je kürzer die Transportwege umso besser werden KEA und CO₂-Äquivalent. Bei Milchverpackungen dagegen liegen die Kunststoffflaschen aus 100 % rPET und aus HDPE knapp vor den GVK-Verpackungen und den Glasmehrwegflaschen, während Milchflaschen aus virgin PET die schlechteste Ökobilanz aufweisen.

- die Weiterentwicklung bzw. Ergänzung von an den beiden EU-Richtlinien orientierten prozess- und produktbezogenen Werks- und Branchenstandards²¹,
- Qualitätsmanagement bei allen Teilprozessen der Abfallaufbereitung,
- Einsatz innovativer Sortiertechnik und Analysemethoden etc.

Zunehmend werden dabei sowohl die Hersteller der originären Neuware sowie die Anwender von Rezyklaten einbezogen. Mit der Gründung von produktbezogenen RAL Gütegemeinschaften, der Vergabe von Gütesiegeln sowie der Erarbeitung verbindlicher DIN-Normen und VDI-Richtlinien sollen Qualitätsanforderungen durchgesetzt werden, um den hohen Anforderungen des Stoffrechts zu entsprechen. So ist bspw. 2014 die *RAL Gütegemeinschaft Wertstoffkette PET-Getränkeverpackungen e. V.* angetreten, mit der Vergabe des RAL-Gütezeichens auf Grundlage transparenter, ökologisch ausgerichteter Qualitätskriterien die Weiterentwicklung von PET-Getränkeflaschen als Produkt und die Akzeptanz von PCR-haltigen Verpackungsprodukten bei Handel und Verbrauchern zu befördern.

DIN-Vorschriften (Auswahl) regeln z. B.:

- die Rückverfolgbarkeit bei der Kunststoffverwertung und Bewertung des Rezyklatgehalts (EN 15343:2007),
- die Charakterisierung von Rezyklaten für die einzelnen Kunststoffsorten (als Beispiele EN 15345:2007; 15342:2007; 15348:2014; 15344:2021; prEN 15348:2022),
- die Probenvorbereitung für die toxikologische Untersuchung von Rezyklatproben (CEN/TS 16011:2013; ISO 10210:2017) oder
- die Verwendung von thermoplastischen Rezyklaten in Kunststoffrohren und Formstücken (prEN 14541-1:2021).

21 Beispielhaft sei hier die im November 2021 veröffentlichte DIN SPEC 91446 genannt. Sie „legt ein System zur Einstufung von Kunststoffrezyklaten entsprechend der Datentiefe ihrer Beschreibung fest, dass die bestehenden Hindernisse für deren industriellen Einsatz abbaut. Zudem definiert sie Methoden, mit denen sich Rezyklate und Rezyklatanteil von Kunststoffmaterialien eindeutig identifizieren und kennzeichnen lassen. Der neue Standard soll den Akteuren entlang der gesamten Wertschöpfungskette so künftig als gemeinsame Sprache dienen. Dabei richtet er sich insbesondere an Anwender, Verarbeiter, Recycler und Entsorger im Bereich Kunststoffe, unterstützt jedoch auch Forschung und Politik.“ [45] Initiator der DIN SPEC 91446 war die cirplus GmbH aus Hamburg, die eine Internetplattform für den Handel mit Kunststoffabfällen und Rezyklaten betreibt. Zum DIN-Team gehörte ein Konsortium aus Wirtschaft und Forschung mit 16 Akteure entlang der gesamten Recycling-Wertschöpfungskette: Hersteller von Sortiersystemen, das DSD, Abfallverwerter, Hersteller und Verarbeiter von Kunststoffgranulaten, die Verbände BDE und VDMA, das Institut für Kunststoffverarbeitung (IKV), die RWTH Aachen sowie mehrere Prüflabore für Kunststoffrezyklate. ([45]; auch Anhang 3, Produktlabel für Rezyklateinsatz gem. DIN SPEC 91446)

Prinzipiell bleibt die Tatsache, dass die (nachvollziehbar) rigiden Anforderungen des Stoff- und des Lebensmittelrechts den Einsatz von Rezyklaten für neue Lebensmittelverpackungen stark limitieren. Hersteller sowie Inverkehrbringer von Lebensmittelverpackungen schlagen daher unter anderem vor:

- eine Anhebung der 5 %-Grenze von Non-Food-Rezyklaten in Food-Verpackungen vor – unter Beibehaltung der 10 mg-Migrationsgrenze;
- eine Aufhebung der Unterscheidung von PCR- und PIR-Rezyklaten für Food-Anwendungen für eine Verbreiterung der Rohstoffbasis, wenn sonst alle Zulassungskriterien erfüllt werden können;
- Entwicklung von Standards für die Verwendung polyolefinischer PCR-Kunststoffe im Lebensmittelbereich und für den wichtigen Markt der Kosmetikverpackungen.²² Dies könnte den Nachfragdruck auf lebensmittelkonforme Sekundärrohstoffe reduzieren und in eine Nachfrage nach Rezyklatqualitäten lenken, die für Verpackungen von Körperpflegemitteln und Kosmetika ausreichend sind.²³

Die Industrie muss, gemeinsam mit Politik, Verbraucherverbänden und den Kompetenzträgern für Standardisierungsprozesse harmonisierte Qualitätsstandards erarbeiten und auf EU-Ebene umsetzen. Die entsprechenden Anpassungen bei den Zulassungskriterien sind Aufgabe der **EFSA**, der Europäischen Behörde für Lebensmittelsicherheit (*European Food and Safety Authority*). Diese Behörde, so die Forderungen aus der Recyclingwirtschaft, dem Handel und von Verbraucherverbänden, muss gestärkt werden, um die anhängigen und zukünftigen Genehmigungsverfahren in der beschriebenen Zielrichtung beschleunigen zu können. (Siehe dazu Auswertung der Befragung von Branchenakteuren am Schluss von Pkt. 3.4.2)

22 Polyolefinische PCR-Kunststoffe (PE, HDPE, LDPE, LLDPE, PP) sind aktuell gegenüber der Lebensmittelverwendung von rPET zulassungsrechtlich benachteiligt, da die Abfallqualität im Vergleich z. B. zu gebrauchten PET-Flaschen inhomogener ist. Zudem werden Kosmetikverpackungen defacto dem Lebensmittelrecht unterworfen. Mit einer Anpassung der Prüf- und Qualitätsstandards analog dem rPET sowie eigenen Zulassungskriterien für Kosmetikverpackungen könnten polyolefinische PCR-Kunststoffe teilweise rPET substituieren und die Rezyklatanwendungen auf eine breitere Materialbasis stellen.

23 Siehe Befragung im Anhang. Interessant ist hier das Start-Up Circleback aus Berlin. Gegenstand des Unternehmens ist die Etablierung eines Pfand-, Rückführungs- und Verwertungssystems für Kosmetikverpackungen, die ja in der Regel aus kompakten, hochwertigen Kunststoffen bestehen [46].

Gesetz über das Inverkehrbringen, die Rücknahme und die hochwertige Verwertung von Verpackungen (Verpackungsgesetz – VerpackG)

Leitziel des Gesetzes ist es, neben der Sicherheit von Verpackungen aller Art den Verpackungsabfall zu reduzieren und zugleich die Recyclingfähigkeit von Verpackungen und deren hochwertige, also stoffliche Verwertung zu fördern. Dafür wird in § 16 (2) die europäische Zielstellung präzisiert mit der Vorgabe, dass Verpackungskunststoffe zu 90 % einer Verwertung zugeführt werden müssen und davon wiederum ab dem 1.1.2022 mind. 70 % werkstofflich zu recyceln sind.

Diese Vorgaben scheinen zunächst hoch zu sein. Bei genauerem Hinsehen erweisen sich die Quotenziele jedoch als dem aktuell Machbaren angepasst. Zudem sind offensichtliche Lücken im Gesetz bzw. nicht eindeutig interpretierbare Regelungen enthalten:

1. Die Quoten 90 % Recyclingzuführung und 70 % werkstoffliches Recycling beziehen sich auf sämtliche Kunststoffverpackungen in Industrie und Handel. Für Postconsumer-Abfälle (PCA) könnte dies bedeuten, dass eine höhere Recyclingquote bei Postindustrial-Abfällen (PIA) eine geringere werkstoffliche Recyclingquote als 70 % bei PCA möglich macht.
2. Gem. § 16 (3) bezieht sich die 70 %-Vorgabe nur auf die Hauptkomponenten der Verpackung. Hat bspw. eine PET-Flasche einen Verschlussdeckel aus einem anderen Kunststoff, würde sich die 70 %-Regel nur auf das PET beziehen. Damit fallen die 70 % bereits defacto um bis zu 5 % geringer aus, da die Anteilsgrenze für Hauptkomponenten auf 95 % festgelegt ist.
3. Eine Grenze für den Masse-Verlust während des Recyclingprozesses infolge der Aussortierung von Fremdstoffen und Minderqualitäten ist im § 16 nicht vorgegeben. Hier dürfte dann die Quote greifen, die in § 1 (4) festgeschrieben ist, wonach 22,5 % Masseanteile nach dem Recyclingprozess wieder zu Kunststoffen werden müssen. Die folgende Beispielrechnung (ohne Berücksichtigung von Pkt. 2. verdeutlicht das Problem:
 - ▷ 10.000 t Anfall Kunststoffverpackungen => 90 % Verwertungspflicht
=> 9.000 t (§ 16 (2))
 - ▷ davon 70 % werkstoffliches Recycling => 6.300 t

- ▷ 22,5 % werkstoffliches Recycling von 9.000 t²⁴ => 2.025 t Kunststoffrezyklate/-mahlgut (§ 1 (49))
- ▷ Damit dürfte der Masseverlust aus dem SuV-Prozess theoretisch 4.275 t betragen, also mehr als das Doppelte gegenüber der produzierten Menge an Kunststoffrezyklaten/-mahlgut.
- ▷ Bezogen auf die ursprünglichen 10.000 t Verpackungsanfall verbleibt eine rechtlich zulässige Quote für die energetische Verwertung von derzeit rd. 80 % vs. 20 % für die werkstoffliche Verwertung von Kunststoffverpackungsabfällen. Dies bedeutet gegenüber dem Zustand von 2020 zwar bereits fast eine Verdopplung der stofflichen Verwertungsquote für Kunststoffverpackungen, ist aber von einer Kreislaufwirtschaft im eigentlichen Wortsinn noch weit entfernt.

Die Vorgabe des Gesetzgebers, die werkstoffliche Verwertung bis 2025 auf 50 % bzw. bis 2030 auf 55 % zu steigern, bedarf daher enormer Anstrengungen der Branche sowie aller Beteiligten am Wertstoffkreislauf.

Zusätzlichen Spielraum könnte das **chemische Recycling** schaffen. Das BMU hatte diesbezüglich klargestellt, dass das chemische Recycling keine werkstoffliche Verwertung im Sinne des VerpackG ist [47, S. 25], [40, S. 11]. Das sichert zum einen, dass sich die Quoten für das werkstoffliche Recycling mit eventuellen Zuwächsen beim chemischen Recycling nicht verringern dürfen. Damit bleibt die Priorisierung des werkstofflichen gegenüber dem chemischen Recycling gewahrt. Zum anderen bedeutet dies, dass sich mit der geplanten Entwicklung des chemischen Recyclings die Gesamtquote des stofflichen Recyclings um den Prozentsatz erhöhen ließe, der dann vom chemischen Recycling erreicht wird.

Hingewiesen sei in diesem Zusammenhang noch einmal auf die beiden zuvor verhandelten *EU-Verordnung 282/2008* sowie *10/2011*. Beide lassen zu, dass Kunststoffe aus „Monomeren und anderen Ausgangsstoffen“, die mit chemischen Recyclingverfahren gewonnen werden, für Lebensmittelverpackungen eingesetzt werden können, wenn sie denselben Qualitätsansprüchen genügen

24 Die Bezugsgröße im VerpackG ist nicht klar. Offen ist, ob sich die 22,5 % effektives werkstoffliches Recycling gem. § 1 (4) auf alle anfallenden Verpackungsabfälle aus Kunststoff = 100 % beziehen oder auf die vorgegebene Mindest-erfassungsquote von 90 % gem. § 16 (2). Im Falle einer Bezugsgröße von 100 % Verpackungsabfall würde sich die zulässige Quote für die energetische Verwertung auf 77,5 % belaufen – was ebenfalls keine akzeptable Zielstellung bedeutet.

wie sonstige zugelassene Kunststoffe.²⁵ Was für lebensmitteltaugliche Verpackungen gilt, sollte erst recht für sonstige Kunststoffverpackungen gelten. Im VerPackG wird die Option des chemischen Recyclings allerdings gar nicht verhandelt. Dies führt unter Umständen dazu, dass es keine Stimuli für Investitionen ins chemische Recycling zur Erhöhung der Recyclingquote bei Kunststoffverpackungen gibt. Dabei wären chemische oder Lösemittel-basierte Verfahren optimal zur Verwertung bspw. von metallbeschichteten Kunststofffolien, GfK- und CFK-Kunststoffen oder dünnen PO-Folien, da es bislang keinen anderen technologischen Ansatz zur Verwertung dieser Verbundkunststoffe gibt. Die Einbeziehung derartiger Abfall- oder Sortierfraktionen ins stoffliche Recycling mittels chemischer Verfahren erhöht daher nicht nur die Recyclingquote für Kunststoffe, sondern ermöglicht z. B. auch die Rückgewinnung von wertvollen Carbonfasern aus CfK-Kunststoffen oder von Metallen aus metallbeschichteten Verpackungen. Zugleich würde damit auch der Anteil von Problemstoffen in der energetischen Verwertung reduziert. Branchenverbände sehen unter anderem aus diesen Gründen entsprechenden Nachbesserungsbedarf beim Gesetzgeber, die o.g. allgemeinen Regelungen der EU-Verordnungen zum chemischen Recycling in deutsches Recht umzusetzen [39].

Spezielle Vorgaben des VerPackG betreffen *Einwegkunststoffgetränkflaschen*, hier muss die Quote für eine getrennte Sammlung bis 2030 auf 90 % gesteigert werden (§ 1 Abs. 3). Hinzu kommt ein verpflichtender Rezyklatanteil von 30 % bis 2030 (§ 30a Abs. 1). Branchen- und Umweltverbände fordern unisono, dass diese Vorgabe zwingend mit Qualitätssicherungsmaßnahmen zur Sicherung der Lebensmittelqualität einhergehen muss²⁶. Bei einer parallelen, weil geförderten

25 Verordnung (EG) Nr. 282/2008 Der Kommission vom 27. März 2008, Abs. (6). In: Amtsblatt der Europäischen Union vom 28.03.2008, S. L 86/10. Siehe auch Verordnung (EG) Nr. 10/2011 Der Kommission vom 14. Januar 2011, Artikel 5, Abs. (2a). In: Amtsblatt der Europäischen Union vom 15.01.2011, S. L 12/9

Anmerkung: Die Verordnung lässt die spezifischen Verfahren des chemischen Recyclings und die damit verwerteten Kunststoffe bewusst offen. Als einziges Kriterium für die Definition genannt ist die Depolymerisation, also Zerlegung der Altkunststoffe in ihre Monomere oder in Bruchstücke der C-H-Ketten, als Ausgangsstoffe für die Synthese neuer Kunststoffe bzw. zur Repolymerisation in ein virgin material. Damit wird der Wissenschaft die Möglichkeit eröffnet, über die bekannten Verfahren zur Depolymerisation von Polyolefinen hinaus auch Verfahren für andere Kunststoffe wie PA, PC oder PET zu entwickeln.

26 So fordert bspw. der bvse e. V. eine „Produktverantwortung 2.0“ für Verpackungen. Hintergrund ist u. a. der steigende Anteil des Online-Handels im Allgemeinen und des Lebensmittel-Online- sowie des To-go-Handels im Besonderen und dem damit erhöhten Verpackungsaufkommen, nicht zuletzt durch Importe [48].

Die Formulierung im § 7 (3) KrWG, wonach im Wertstoffkreislauf die Anreicherung von Schadstoffen auszuschließen ist, geht nachweislich auf den Nachbesserungsvorschlag der Umweltschutzorganisation GermanZero zurück; ebenso die Forderung, dass trotz Erhöhung der Rezyklatquoten die rechtlichen Vorgaben des Lebensmittelrechts einzuhalten, schärfer zu prüfen und ggf. mit erhöhten Strafgehdern zu sanktionieren sind [49, S. 448 sowie S. 421, 425].

Ausweitung der Pfandsysteme verschärft sich dadurch der Wettbewerb um die hochqualitativen Abfallchargen. Langfristig ist diese Situation nur aufzulösen, in dem die vorherigen Prozessstufen vom Design for Recycling (D4R) über effektivere Sammelsysteme bis hin zur besseren Sortiertechnik in der Breite zu höheren Abfallqualitäten führen.

Die Umweltverbände schlagen als ein mögliches Steuerungsinstrument zur Durchsetzung eines hohen Rezyklatanteils in Einweggetränkeflaschen aus Kunststoff vor, die durch die EU 2019 eingeführte sogen. *Plastiksteuer auf nicht recycelte Einweg-Behälter*²⁷ in Deutschland neu zu gestalten:

- Die pauschale Plastiksteuer soll nicht mehr aus dem Bundeshaushalt finanziert werden (Der Bund übernimmt aktuell diese Kosten unter anderem mit der Begründung, dass es sich bei der Plastiksteuer um eine Sondersteuer handelt, die vornehmlich der Finanzierung des EU-Haushaltes dient, um die Brexit-bedingten Einnahmefälle zu kompensieren. Zudem würde die Plastiksteuer der EU-Staaten mit ihren übrigen Zahlungsverpflichtungen an die EU verrechnet und habe verwendungsseitig auch keine ökologische Zweckbindung) [50].
- Gefordert wird, die Plastiksteuer im Bereich der am System beteiligungspflichtigen Verpackungen den Inverkehrbringern und der Verpackungsindustrie aufzuerlegen.
- Dabei solle die Steuer von aktuell pauschalen 0,80 € je kg nicht recycelten Kunststoff erhöht werden, jedoch ausschließlich für eingesetzten Neukunststoff. Für Rezyklate dagegen müssten Abschläge erfolgen [42, S. 31], [51].
- Einnahmen aus einer Plastiksteuer sollten zweckgebunden für die Weiterentwicklung des Kunststoffrecyclings eingesetzt werden.²⁸

Während z. B. der *VKU Verband der Kommunalen Unternehmen* diese Strategie vorbehaltlos unterstützt [50], schränken Branchenverbände wie *bvse*, *BDE*, *GKV* und *IK Industrievereinigung Kunststoffverpackungen* ein, dass die angestrebte ökologische Lenkungswirkung auch bei einer verbesserten Plastiksteuer unterlaufen werden könne. Dies wäre z. B. der Fall, wenn Kunststoffver-

²⁷ Richtlinie (EU) 2019/904 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 5. Juni 2019 über die Verringerung der Auswirkungen bestimmter Kunststoffprodukte auf die Umwelt, ABl. L 155 vom 12.6.2019, S. 1.

²⁸ Eine sogen. „echte Zweckbindung“ im haushaltsrechtlichen Sinne ist in der Bundesrepublik bei einer strikten Verwendungsbeschränkung bestimmter Einnahmen für einen bestimmten Ausgabezweck gegeben [52, S. 4].

packungen substituiert werden durch alternative Materialien wie Weißblech, Glas oder Papier, die bei vielen Einsatzfällen einen größeren CO₂-Fußabdruck haben als dem Recycling zugeführte Einweg-Kunststoffverpackungen, oder wenn die Rohstoffe für die Kunststoffprodukte aus dem chemischen Recycling stammen. Die Verbände präferieren daher anstelle der Plastiksteuer eher ein Bonussystem wie die leistungsabhängige Vergütung von hohen Verwertungsquoten aus einem zentralen Fonds, in den alle Verpackungshersteller und Inverkehrbringer einzahlen [53].

Wer z. B. registrierungspflichtige Verpackungen mit einem hohen Rezyklatanteil in Verkehr bringt, zahlt weniger Beteiligungsentgelte als jene mit einem niedrigen Rezyklatanteil oder erhält eine Rückzahlung.²⁹

Das VerPackG weist dem *Zentralen Verpackungsregister*, bei dem jede Verpackungslösung angemeldet und genehmigt werden muss, eine höhere Verantwortung für den Ausbau des Kreislaufsystems zu. So kann das Register einer Verpackungslösung die Zulassung verwehren, wenn eine schadlose Verwertung nicht möglich ist (§ 7 Abs. 5). Damit wird die Verantwortung über die konkrete Verwertungsform zunächst dem Inverkehrbringer überlassen. Die Zentrale Stelle kann die Zulassung aber nicht verweigern, wenn der Inverkehrbringer eine thermische Verwertung der Verpackung favorisiert, obwohl eine stoffliche Verwertung nach guter technischer Praxis³⁰ möglich wäre. Mit dem § 26 Abs. 1 Pkt. 11 VerPackG hat sich der Gesetzgeber allerdings selbst in die Pflicht genommen, Mindeststandards für die Bemessung der Recyclingfähigkeit von Verpackungen zu entwickeln und auf dem Verordnungsweg durchzusetzen. 2019 wurden vom UBA in Kooperation mit Verbänden erstmals Mindeststandards für alle Verpackungsarten inkl. Kunststoff als empfehlende Orientierung für die dualen Systeme formuliert. Diese haben damit eine einheitliche Grundlage, um in eigener Regie ein Bemessungsentgeltsystem zu entwickeln. Dabei hat der Gesetzgeber bewusst „auf rechtliche Vorgaben in Gestalt konkreter Zu- oder Abschläge bei den Beteiligungsent-

29 Zu weiteren möglichen Varianten eines Bonus-Malus-Systems siehe auch den Abschnitt „Lösungsansatz Beteiligungsentgelte“, S. 126

30 „Nach guter technischer Praxis“ – entspricht dem durchschnittlichen technischen Stand in der Branche; repräsentiert also nicht die neuesten, innovativen Lösungen einerseits und auch nicht die wirtschaftlich abgeschriebene, überalterte Technik andererseits. Dem gegenüber beschreibt „Stand der Technik“ den in der Praxis bereits mehrfach bewährten höchsten Entwicklungsstand der Technik.

gelten verzichtet, da diese zum einen nach derzeitigem Kenntnisstand nicht allgemein verbindlich quantifiziert werden können und zum anderen einen intensiven Eingriff in die wettbewerbsrechtlich geschützte Preisgestaltungsfreiheit der Systeme bedeuten würden“ [54, S. 3]. Offen bleibt, inwieweit auf dieser Grundlage neue Verpackungslösungen registrierungsfähig sind oder mit zusätzlichen Gebühren belastet werden können, wenn sie dennoch thermisch verwertet werden. Ob die angestrebte Lenkungswirkung zur Erhöhung der Recyclingquote eintritt oder z. B. die Zahlung höherer Beteiligungsentgelte durch noch höhere Kosteneinsparungen bei den Verwertungspfaden chemisches Recycling/thermische Verwertung dennoch vorteilhaft sein kann, ist erst in den nächsten Jahren absehbar.

Damit die Beteiligungsentgeltsysteme generell ein wirksames Instrument zur Förderung höherer Recyclingquoten werden können, sind nach Aussagen von Branchenverbänden letztlich die vielen Details der Umsetzung zu klären. So seien „Schlüssellfragen“ offen, wie z. B., ob alle Inverkehrbringer einbezogen werden sollen oder sog. Klein-Inverkehrbringer (z. B. Imbissbetreiber) befreit werden. Unklar sei weiterhin, wie PCR-Gehalte ermittelt werden sollen – analog zur Bewertung von PCR-Gehalten bei auszuschreibenden Produkten im Rahmen von VgV und UVgO (Die Aussage zeigt, dass sich die neue DIN SPEC 91446 in der Praxis noch nicht etabliert hat, obwohl mit dem *BDE* und dem *VDMA* Branchenverbände an ihrer Ausarbeitung beteiligt waren). Sind bei evtl. Rückvergütungen Sortier- und Verwertungsunternehmen genauso wie Inverkehrbringer einzubeziehen? Werden Unterschiede zwischen den Kunststoffarten gemacht? Wie müssen die Zuschläge verwendet werden? Soll das PCR-abhängige Beteiligungsentgelt über die dualen Systeme oder über eine Abgabe an eine zentrale Stelle (Fondslösung) erhoben werden? [55] – Die UBA-Studie von 2021 zu den ersten Erfahrungen mit dem § 21 VerPackG und den Mindeststandards gibt dazu erste konkrete Antworten, aber in der Praxis der Entsorgungswirtschaft greift die angestrebte Lenkungswirkung noch nicht [56].

Zwischenfazit:

Das Spannungsverhältnis zwischen dem Machbaren im Status quo des Kunststoffrecyclings und den Erfordernissen der Zukunft spiegelt sich auch in den

relevanten Gesetzen und Verordnungen wider. Um seine Steuerungsfunktion in Richtung einer möglichst vollständigen circular economy erfüllen zu können, muss der Rechtsrahmen sowohl hinsichtlich seiner Möglichkeiten als auch in Bezug auf regulatorische Fehlstellen und Fehlanreize immer wieder durchleuchtet, angepasst und weiterentwickelt werden.

Die Forderungen der Recyclingbranche sowie von Umweltverbänden an die Politik im Hinblick auf Gesetzesanpassungen sind von der neuen Bundesregierung z. T. schon als Aufgabe aufgenommen worden. Dabei geht es um folgende Schwerpunkte [37]:

- **KrWG:** Priorisierung der Abfallvermeidung; Produktstatus statt Abfall – qualitätsgesicherte Abfallprodukte sollen aus dem Abfallrecht entlassen werden und Produktstatus erlangen; Erhöhung der Verbindlichkeit des § 45
- **VerPackG:** Mehrwegpflicht; recyclinggerechtes Verpackungsdesign – gesetzlich verankertes Fondsmodell + ökologisch orientierte Beteiligungsentgelte (ggf. über eine zielführende Plastiksteuer); Einführung eines Recycling-Labels inkl. verbindlicher Qualitätsstandards für Rezyklate analog des Labels gem. DIN SPEC 91446, *Anlage 3*; digitaler Produktpass (z. B. als „digitaler Zwilling“ dieses Labels oder als Voraussetzung für dieses Label); Bewertung/Präferenzierung von Verpackungslösungen auf Basis von wissenschaftlich basierten LCA und CO₂-Food-Print-Analysen
- **Chemisches Recycling**³¹: muss als Verfahrensoption in allen relevanten Gesetzen verankert werden (KrWG, VerpackG, WertstoffG ...) – unter Beibehaltung der Priorisierung des werkstofflichen Recyclings
- **EU-Mindestrezyklat-Einsatzquote:** produkt- sowie materialspezifisch auf EU-Ebene festschreiben; harmonisierte Berechnungsmethoden zur Feststellung des Rezyklatanteils in Produkten/Verpackungen; Überarbeitung EFSA-Kriterien für Stoffzulassung

31 Das chemische Recycling lehnen einige Umweltverbände allerdings ab, vor allem wegen technologischer Risiken und dem möglichen Effekt, dass Abfallvermeidung, Wiederverwendung, Ökodesign und werkstoffliches Recycling unterlaufen werden könnten [57], [58].

4.2 Beschreibung der Recyclingpfade

Die Recyclingpfade lassen sich nach Sammlung und Sortierung grob in mechanisches und chemisches Recycling aufteilen. Zum mechanischen Recycling gehört die klassische Sortierung der Kunststoffabfälle, die Zerkleinerung und Trennung sowie die Aufbereitung bis hin zum Rezyklat. Neu ist das lösemittelbasierte Recycling, bei dem die Kunststoffe anhand ihrer Löslichkeit getrennt werden. Die chemischen Recyclingpfade, bei denen das Polymer des Kunststoffs in Bruchstücke zersetzt wird, lassen sich hinsichtlich Solvolyse, Pyrolyse und Vergasung unterteilen. Während beim mechanischen Recycling das Polymer bzw. der Kunststoff mit Verunreinigungen zurückgewonnen wird, wird beim chemischen Recycling das reine Monomer (Polymerisation-Grade) gewonnen, sodass Kunststoffe über die herkömmlichen Technologien der Polymerchemie in Neuwarenqualität wieder erzeugt werden können. Jedoch muss über alle Prozessstufen mit Nebenprodukten und Verlusten gerechnet werden.

4.2.1 Einsatzfelder und -mengen von Rezyklaten aus dem mechanischen Recycling

Inwieweit eine bestimmte Verwertungsrouten aus wirtschaftlicher und werkstofflicher sinnvoll ist, hängt grundlegend davon ab,

- welche Mengen an Abfällen zur Verfügung stehen [5],
- welche Qualitäten diese Abfallströme aufweisen.

Wie bereits erwähnt, wird nur ein geringer Teil der in Verkehr gebrachten Kunststoffe werkstofflich verwertet (siehe Abb. 10). Der Großteil wird verbrannt, sodass die nach dem Verpackungsgesetz geforderten Recyclingquoten bei einer Output-bezogenen Berechnung faktisch nicht erreicht werden könnten.

Im Verpackungssektor (die vier wichtigsten Verpackungsanwendungen sind Lebensmittel, Kosmetik, medizinische Produkte und Reinigungsmittel bzw. Öle [44]) wäre mit einer hohen Einsatzquote von Kunststoffen mit 34 % (siehe Abb. 12) auch der höchste Einsatz von Rezyklaten in diesem Bereich zu erwarten.

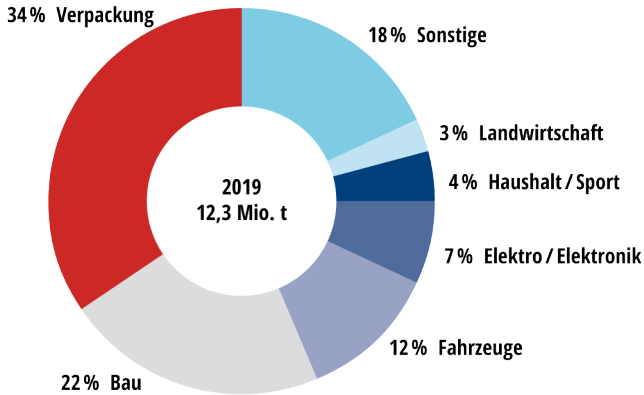


Abb. 12: Nachfrage nach Kunststoffwerkstoffen in 2019 [59, S. 23]

Aufgrund des veränderten Eigenschaftsprofils der Regranulate und der damit für die originäre Anwendung ungeeigneten Beschaffenheit ist jedoch eine Verschiebung der Einsatzfelder von Rezyklaten in die Bereiche Bau und Landwirtschaft zu verzeichnen (siehe Tabelle 8).

Die für Verpackungen angegebenen Rezyklat-Anwendungen sind geringer und zu einem nicht unerheblichen Anteil auf das PET-Flaschenrecycling unter Nutzung der Solid State Polykondensation (SSP) zurückzuführen (siehe auch Abb. 24).

Der Gesamtmarkt an PET in Deutschland beträgt mindestens 1.076.000 Tonnen. Davon sind 660.000 Tonnen primäres PET, der Rest ist Sekundärmaterial [60].

Im Einzelnen werden die hergestellten Rezyklate in Deutschland wie folgt eingesetzt (Tabelle 7 und Tabelle 8).

Kunststoff- verarbeitung 2019	Insgesamt (Neuware u. Rezyklat) (kt)	Verarbeitung von Neuware und Rezyklat			
		Neuware (kt)	Rezyklat (kt)	Neuware (%)	Rezyklat (%)
Verpackung	4.369	3.895	474	89,1 %	10,9 %
Bau	3.583	2.749	834	76,7 %	23,3 %
Fahrzeuge	1.509	1.426	83	94,5 %	5,5 %
Elektro/Elektronik	881	850	31	96,5 %	3,5 %
Haushaltswaren, Sport/Spiel/Freizeit	464	454	10	97,8 %	2,2 %
Möbel	456	435	21	95,4 %	4,6 %
Landwirtschaft	586	372	214	63,5 %	36,5 %
Medizin	271	271	0	99,9 %	0,2 %
Sonstiges	2.116	1.839	277	86,9 %	13,1 %
Total	14.235	12.290	1.945	86,3 %	13,7 %

Tab. 8: Menge der verarbeiteten Kunststoffwerkstoffe nach relevanten Branchen 2019 [5]

Tabelle 8 stellt die Nutzung von Rezyklaten in den verschiedenen Branchen dar und gibt entsprechende Beispiele.

Die Verpackungs- und die Baubranche setzen die höchsten Rezyklat-Mengen ein, Verpackungsfolien (mit 38,5 %) und Bauprofile (mit 33,5 %) stellen in diesen Branchen die beiden am meisten auf Rezyklat-Basis hergestellten Halbzeuge dar. In der Fahrzeug-Industrie werden prozentual die höchsten Rezyklat-Anwendungen mit 53,5 % im Interieur-Bereich realisiert.

Branche (Kunststoff- verbrauch in kt)	Anteil an Rezyklat-Anwendungen im verarbeiteten Ausgangsmaterial			
	über 50 %	zwischen 30 & 50 %	zwischen 30 & 10 %	unter 10 %
Verpackung (4.378)		Folien (38,5 %), z. B. Verpackungs- und Luftpolsterfolien, Transport und Versandfolien: 100 bis 150 kt	Flaschen, Kanister, Hohlkörper < 5 l (15,0 %) z. B. Getränkeflaschen: 120 bis 130 kt	Verschlüsse (9,5 %)
			Becher, Dosen, Stiegen (14,5 %), z. B. Paletten und IBC: 50 bis 100 kt	Sonstiges u. a. Hülsen, Spulen (7,0 %)
			Tragetaschen, Säcke (10,0 %)	Fässer, Kanister, Eimer, Hohlkörper > 5 l (5,5 %)
Bau (3.520)		Profile (33,5 %) z. B. Straßenbauprodukte wie Bakenfüße, Pfosten, Leitkegel, Absperrungen etc.: 100 bis 150 kt	Rohre (27,0 %) z. B. Kabelschutzrohre, Drainagerohre: 50 bis 70 kt	
			Dämmung, Isolierung (26,5 %)	
			Sonstiges, u. a. Hülsen und Spulen (13,0 %)	
Fahrzeuge (1.611)	Interieur (53,5 %)		Exterieur (17,0 %)	
			Under the Hood (Motorinnenraum) (15,0 %)	
			Elektrik/Licht (14,0 %)	
Elektro/ Elektronik (901)		Kabel/Installations-technik (34,0 %)	Sonstiges (25,0 %)	
			Weißer Ware (weiße Hausgeräte) (24,0 %)	
			IT/Telekommunikation (10,0 %)	Braune Ware (elektron. Geräte) (6,5 %)

Tab. 9: Anwendungen von Rezyklaten in einzelnen Branchen sowie zugeordnete Produktbeispiele [5], [7]

Zielkategorie Kunststoffsverpackungen (Hauptwerkstoff)	Beispiele	Sortierfraktion	Verpackungsbereich		Nicht-Verpackungsbereich	
			Nahrungsmittelkontakt	Sonstige Verpackungen	Ersatz Primärrohstoff	Ersatz sonstige Werkstoffe
Folie aus LDPE	Tragetaschen, Luftpolsterfolie	Folienfraktion (LDPE)	-	Blasfolien wie Tragetaschen	Blas- und Castfolien wie Mülltüten/Abfallsäcke, Malerplanen, flexible Spritzgussanwendungen (z. B. Mörtel-eimer)	Intrusionsprodukte wie Industriepaletten
Flaschen, Eimer, Kanister aus HDPE	Flaschen für Kosmetikprodukte und Reinigungsmittel	PE-Fraktion	-	Spritzgussanwendungen wie Farbeimer	Extrusionsprodukte wie Rohre und Spritzgussanwendungen wie Mörtelkübel oder Abstreifgitter	-
Flaschen, Schalen, Becher aus PP	Margarine- und Joghurtbecher, Shampoo-Flaschen	PP-Fraktion MPO-Fraktion	-	Spritzguss- und Tiefziehnanwendungen wie Pflanztopfe, Kisten	Spritzguss- und Extrusionsanwendungen wie Mülleimer, Aufbewahrungsboxen, Büroartikel (Mappen)	-
Flexible Multilayer-Verpackungen, polyolefin-basiert	Bonbontüten, Wickler, Standbodenbeutel, Druckverpackungen	Misch-kunststoffe (zukünftig MPO flex)	-	-	Intrusionsprodukte, wie Industriepaletten	Intrusionsprodukte, wie Palsaden, Spielgeräte, Parkbänke, Abdeckplatten, Rasengittersteine
Becher, Schalen aus PS	Joghurtbecher, Obstschalen	PS-Fraktion	-	Tiefziehnanwendungen, wie Pflanzentrays und Spritzguss wie Kleiderbügel	Spritzgussanwendungen wie Büroartikel (Ablagekörbe) und Wickelspulen	-
Getränkeflaschen aus PET	Einweg-Pfandflaschen	Farbsortierte PET-Getränke-Flaschen	Blasform- und Tiefziehnanwendungen wie Getränkeflaschen, PET-Schalen (Trays)	Blasform- und Tiefziehnanwendungen wie Spülmittel-Flaschen, Tiegel und Schalen, Umreifungsänder	PET-Fasern (Textilien, Fleece und Dämmstoffe)	-
Flaschen aus PET	Getränke-, Waschmittel- und Haushaltsreiner-Flaschen	PET-Flaschen aus DS	-	Blasform- und Tiefziehnanwendungen wie Spülmittel-Flaschen, Tiegel und Schalen, Umreifungsänder	PET-Fasern (Textilien, Fleece und Dämmstoffe)	-
PET opak, PET-Thermoforms, sonstige Kunststoffe (z. B. PLA, P(V))	Ketchup-Flaschen, Schalen für Wurst und Käse	Mischkunststoffe	-	-	-	-

Tab. 10: Einsatz von Rezyklaten im Verpackungs- und Nichtverpackungsbereich [24, S. 142]

Betrachtet man die Verwendung von Rezyklaten speziell aus Verpackungsabfällen, (siehe Tabelle 9 [24]), kann festgestellt werden, dass Rezyklate – auch aufgrund der geltenden rechtlichen Regelungen – hauptsächlich im Non-Food-Bereich eingesetzt werden. Einzige wesentliche Ausnahme stellen wieder Rezyklate aus dem PET-Flaschenrecycling dar, wo aus PET-Flaschen entweder neue PET-Flaschen oder PET-Schalen erzeugt werden. Der Grund hierfür ist, wie oben bereits erwähnt, die kontrollierte, sortenreine Sammlung des PET-Materials und die Anwendung der Solid-State-Polymerisation (SSP) zum Ausgleich der Veränderungen während der Nutzungsphase. Die SSP ermöglicht durch eine chemische Reaktion, dass die Makromoleküle des PET, die durch die Nutzungsphase getrennt, d. h. kürzer geworden sind, sich wieder verbinden.

Rezyklate aus PET, die aus den dualen Systemen stammen, dürfen nicht in den Kontakt mit Nahrungsmitteln gebracht werden oder finden gar keine werkstoffliche Verwertung (letzten beiden Zeilen der Tabelle 9).

Allgemein gesehen stellt damit die Wiederverwendung von Rezyklaten aus dem Lebensmittelbereich im Lebensmittelbereich die größte Hürde dar. Von ca. 3,25 Mio. t Kunststoffverpackungen [61], die in Deutschland pro Jahr eingesetzt werden³², entfallen 40 % (1,2 Mio. t) auf den Lebensmittelbereich (Getränkeverpackungen, formstabile Verpackungen, flexible Verpackungen, geschäumte Verpackungen und Kunststoff-Papier/Pappe-Verbunden) sowie 60 % auf Nicht-Lebensmittelanwendungen bzw. Transportverpackungen.

- Ca. 580 kt an (Primär)Kunststoffen werden in Getränkeverpackungen eingesetzt; davon sind ca. 470 kt PET, der Rest PE und PP für Laminierungsfolien und Verschlüsse.
- Ca. 350 kt sind flexible Folienverpackungen (180 kt davon aus Monomaterialien).
- Ca. 360 kt sind formstabile Verpackungen, aber keine Getränkeverpackungen (270 kt davon aus Monomaterialien).
- Ca. 14 kt werden im Verbund mit Papier und Pappe (ohne Getränkekartons) eingesetzt.

³² Die 3,25 Mio. t jährlich eingesetzten Kunststoffverpackungen in Dt. sind mengenmäßig nicht identisch mit den produzierten Kunststoffverpackungen gem. Tabelle 10. Die Angabe von 3,25 Mio. t berücksichtigt das Saldo von in Dt. verwendeten Kunststoffverpackungen aus dt. Produktion zzgl. der importierten und abzgl. der exportierten Verpackungen.

Zieht man die Getränkeverpackungen ab, die schon sortenrein gesammelt werden, so bleiben im Lebensmittelbereich ca. 724 kt/a Kunststoffabfälle übrig, die nicht wieder im gleichen Segment eingesetzt werden können [62].

Zwischenfazit:

Da Kunststoffabfälle aus nicht sortenreinen Sammelsystemen ein extrem heterogenes Gemisch darstellen und mit Kontaminationen jeglicher Art gerechnet werden muss, können Rezyklate bis auf wenige Ausnahmen nicht in ihren ursprünglichen Einsatzfeldern verwendet werden. Neben Verunreinigungen spielt die Degradation der Kunststoffmaterialien eine Rolle. Haupthindernis ist die Wiederverwendung von Verpackungen im Lebensmittelbereich mit Nahrungsmittelkontakt, der für die meisten Rezyklate nicht erlaubt ist. Ohne die Recyclingpfandflaschen können, soweit überhaupt technisch möglich, 724 kt pro Jahr (das sind ca. 12 % aller Kunststoffabfälle) rein rechtlich nicht in ihrer ursprünglichen Anwendung verwendet werden. Ähnliches gilt für den Kosmetikbereich.

Die Frage hier lautet, inwiefern analog zum PET-Flaschenrecycling eine ähnliche Verwertung bei anderen Lebensmittelverpackungen oder sonstigen Kunststoffprodukten sinnvoll sein könnte, um gesichert qualitativ homogene und hochwertige Rezyklate zu gewinnen. Hinzu kommt die Frage nach den Voraussetzungen, um auch Rezyklate anderer Polymersorten im Verpackungs- und Lebensmittelbereich einsetzen zu können, wie z. B. PO-Kunststoffe aus sortenreiner Sammlung.

4.2.2 Effizienz der unterschiedlichen Sammelsysteme

Für das mechanische Recycling, aber auch für das chemische Recycling, müssen die Abfälle zunächst gesammelt werden, um sie dann in Kunststoffströme zur Aufbereitung und Weiterverarbeitung zu lenken. Allgemein bekannt sind die Sammelsysteme des Grünen Punkts und die des Handels. Hinzu kommen die Abfallströme aus Post-Industrial-Abfällen (PIA).

Aktuell gibt es bei den Sammelsystemen **zwei entgegengesetzte Entwicklungstrends**:

- Zum einen soll die Erfassungslogistik vereinfacht und die hohe Zahl von Fehlwürfen in den Sammelcontainern als Normalzustand unterstellt werden. Das führt zu Regelungen, immer mehr bzw. sogar gänzlich alle Hausmüllabfälle inkl. Verpackungen zusammen zu sammeln und im Gegenzug die Sortiertechnik in den Recyclingbetrieben um 1–2 Sortierstufen zu erweitern und deren Trennschärfe durch technische Innovationen zu verbessern.
- Der andere Trend besteht in einer weiteren Differenzierung der Sammelsysteme, so dass für die Verpackungen mehrere Container vorgesehen werden, z. B. für PET-Einwegflaschen, feste Kunststoffe (Shampoo-Flaschen), Leichtverpackungen/Folien, Metalldosen, Verbundkunststoffe (metallbeschichtete Tüten) etc. Dieser Trend zielt auf eine Aufwandsreduzierung bei der Sortierung in den Recyclingunternehmen und auf eine Verringerung des Anteils der Sortierreste.

Diese Trends können nicht losgelöst von der Entwicklung auf dem Markt der Kunststoffverpackungen bzw. Verpackungen im Allgemeinen betrachtet werden.

So wird auf der einen Seite Umweltfreundlichkeit inkl. Recyclingfähigkeit der Verpackungssysteme immer wichtiger, auch weil die Konsumenten hier eine höhere Sensibilität entwickeln. Auf der anderen Seite wird eine erweiterte Funktionalität der Verpackung erwartet. Zu den herkömmlichen Verpackungsfunktionen wie Haltbarkeitsverlängerung, Schutz vor Verschmutzung, Keimbefall, Oxidation oder Vertriebskomfort kommen neue Funktionalitätstrends hinzu, u. a. Feuchtigkeitsregulierung, aber auch Informations- und Kontrollfunktionen sowie das Marketing [63, S. 16].

Dies führt zu komplexen Multilayer-Verpackungen und geht zu Lasten einer Recyclingfähigkeit, für die eigentlich Mono-Verpackungen aus reinen Kunststoffen die ideale Voraussetzung wären. (Siehe Abschnitt 3.4.1) Auf der anderen Seite wird der Einsatz von Rezyklaten in solchen Funktionsverpackungen auf extrem hohe Qualitäten eingeschränkt.

4.2.2.1 Sammelsysteme

Eine allgemeinverbindliche Entscheidung für bestimmte Sammelsysteme scheint nicht sinnvoll zu sein, da diese stets in einem größeren System eingebunden sind und neben ökologischen auch und rein ökonomischen Gesetzen folgen müssen.

Sehr grob können die Sammelsysteme in **Hol- und Bringsysteme** eingeteilt werden.

Systeme	Beschreibung	Merkmale	Beispiele
Holsysteme	Wertstoffe werden am Verbrauchsort gesammelt und von dort abgeholt	Geringerer Sammel- und Logistikaufwand für den Verbraucher Geringere Sammelreinheit und hoher Sortieraufwand Geringere Ausbeuten recyclebaren Materials Unsicherheit bzgl. Störstoffe	Gelbe Tonne, gelber Sack, Wertstofftonne usw.
Bringsysteme	Wertstoffe werden in Sammelstellen gebracht	Hoher Sammel- und Logistikaufwand Hohe Sammelreinheit und geringer Sortieraufwand Höhere Sicherheit bzgl. Störstoffe	Wertstoffhöfe, Einweg- und Mehrwegpfandsysteme des Handels

Tab. 11: Hol- und Bringsysteme (Quelle: eigene Darstellung)

Ein quantitativer Vergleich von verschiedenen Systemen kann nicht direkt erfolgen, da die Datenbasis sehr unterschiedlich ist. Bei Pfandsystemen ist außerdem die Rückführungslogistik weitgehend in den Händen der Verbraucher und der Handelsdistribution. Bringsysteme werden meist privat organisiert, wenn entsprechende Anreize (gesetzlich, wirtschaftlich, gesellschaftlich) vorliegen (z. B. [64], [65]).

Die im Rahmen dieser Studie durchgeführte Befragung ergab, dass die Teilnehmer aus der Abfall- und Recyclingbranche sich nicht einig sind, wie sich die verschiedenen Sammelsysteme auf die Rezyklatmenge und Rezyklatqualität auswirken. Tatsächlich wurden die verschiedenen Alternativen (mehr stoffspezifische Wertstofftonnen / eine einheitliche Wertstofftonne / Pfandsystem) gleich bewertet.³³

33 Befragung: Fragen 8 und 9

Im Folgenden werden kurz verschiedene relevante Zielgrößen diskutiert, die auch gut die Zielkonflikte darstellen. Anhand von Beispielen können tendenzielle Aussagen zu den Sammelsystemen getroffen werden.

4.2.2.2 Zielgrößen

Technische Zielgrößen:

Erfassungsquote (auch Sammelquote): Hier wird die Frage gestellt, wie hoch die Erfassung der PCA im Vergleich zum Aufkommen ist. Die deutsche Erfassungsquote ist generell im internationalen Vergleich hoch [66], [67, S. 44]. Grundsätzlich ist eine hohe Erfassungsquote eine notwendige Voraussetzung für Recycling. Diese ist beispielsweise nicht gegeben, wenn auf eine Sammlung von Kunststoffen im Hausmüll von vornherein verzichtet wird. Entscheidend scheint jedoch zu sein, ob und wie die notwendigen Qualitäten erreicht werden können.

Verwertungsquoten: Hier werden die erfassten Kunststoffe in die verschiedenen Verwertungen aufgeteilt.

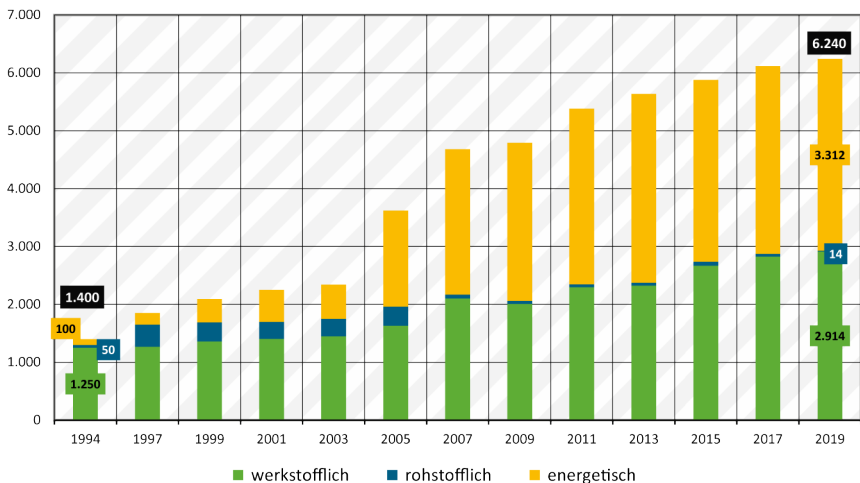


Abb. 13: Entwicklung der Verwertung der Kunststoffabfälle [68]

Abb. 13 zeigt, dass die Verwertungsquoten in den letzten Jahren keine substantiellen Fortschritte gemacht haben. Dies wird auch in anderen Studien immer wieder bestätigt (z. B. [5], [69]).

Eine negative Zielgröße ist der Ausschluss von **Stör- und Gefahrenstoffen** [70]. Insbesondere für den Einsatz von Rezyklaten in hochregulierten Anwendungen (Sicherheitsanwendungen, Lebensmittelverpackungen etc.) ist dies ein entscheidender Faktor insbesondere für eine breitere Nutzung der Rezyklate. Dies ist jedoch auch recht komplex, da bei einer Unmenge von Materialien kaum festgelegt werden kann, welche Störstoffe wann zu erwarten sind.

Der Ausschluss von Stör- und Gefahrenstoffen kann generell leichter bei Bringsystemen erreicht werden, da die Gefahr von Fehlwürfen deutlich niedriger liegt. Insbesondere bei Pfandsystemen sind die Sammelstellen immer interessiert, alles auszuschließen, was nicht bepfandet wurde, also auch Fehlwürfe.

	Gesamt Verpackungs- kunststoffe [kt]	Einweg- Pfandsystem [kt]	Mehrweg- Pfandsystem [kt]
Verbrauch	4369	406,1	17,1
Sammlung	3160	390,6	16,9
Rücklaufquote	72 %	96 %	99 %

Tab. 12: Beispiel Rücklaufquoten Deutschland 2019 [5] und [28]

Die Substitutionsquote definiert das Verhältnis von eingesetzten Sekundärrohstoffen zum gesamten Materialaufwand (Primär- und Sekundärrohstoffe) [71]. Auf dem Weg in eine echte Kreislaufwirtschaft stellt die Substitutionsquote eine entscheidende Größe dar. Im Jahr 2019 lag die Substitutionsquote in Deutschland bei Kunststoffen insgesamt bei ca. 13,7 % [5, S. 17].

(Zu statistisch-methodischen Problemen bei der Bestimmung der Recyclingquoten s. *Exkurs 1*, S. 35 f.)

Ökonomische Zielgrößen:

Ökonomische Zielgrößen wie Sammeleffizienz haben ihre Berechtigung, da sie die Sinnhaftigkeit der wirtschaftlichen Entscheidungen im komplexen System

Kreislaufwirtschaft am besten widerspiegeln. Technische Zielgrößen können häufig in ökonomische Zielgrößen überführt werden.

Weiterhin ist es entscheidend, wie weit man die wirtschaftlichen Akteure für Investitionen in die Verbesserung von Kreislaufstrukturen gewinnen kann.

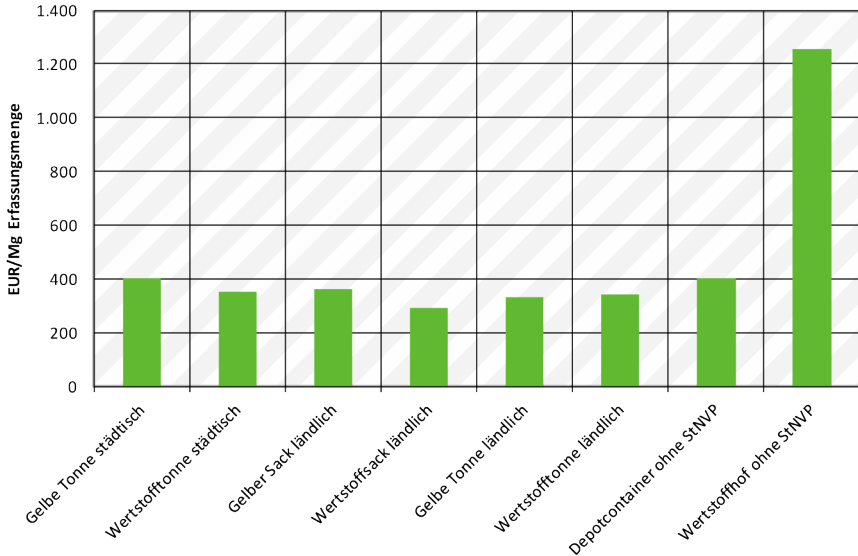


Abb. 14: Sammelsysteme: Systemkosten bezogen auf die Rezyklatausbeute [72, S. 31]

Abb. 14 zeigt die Systemkosten von verschiedenen Sammelsystemen, einschließlich Sortierung und Verwertung, bezogen auf die Rezyklatausbeute.

Dabei sind die Holsysteme (Gelbe Tonne bis Depotcontainer) substanziell kosteneffizienter als das einzige hier betrachtete Bringsystem *Wertstoffhof*. Da es sich beim betrachteten Wertstoffhofsystem um ein vorwiegend ländliches System handelt, sind hier die Logistikkosten vergleichsweise hoch. Hier kann jedoch nach Auffassung der Autoren der Studie auf eine Vorsortierung aufgrund einer fraktionierten Sammlung verzichtet werden. Den gleichen Vorteil haben auch Pfandsysteme, wo die Sortierung ebenso aufgrund der sortenreinen Sammlung weitgehend nicht erforderlich ist [72, S. 31 ff.].

Bestimmte gesellschaftliche Kosten werden jedoch nicht in Preisen ausgedrückt und daher nur bedingt in die Entscheidungen der Wirtschaftssubjekte einbezogen. Diese sind beispielsweise CO₂-Belastung (der sogen. „CO₂-Rucksack“ aus Erdölförderung, -transport und -verarbeitung bei der Herstellung der Neuware), die Umweltverschmutzung (Mikroplastik in der Umwelt, Kunststoffe in den Meeren usw.). Um wünschenswerte Entscheidungen zu erreichen, könnten diese externen Effekte internalisiert, also mit einem Preis versehen werden.

Umweltbezogene Zielgrößen:

Durch die methodischen Defizite der ökonomischen Zielgrößen wurden die Zielsysteme erweitert. Beispiele sind:

KEA – Der kumulierte Energieaufwand (KEA) bewertet den Energieaufwand, der für die Herstellung von Produkten und für Dienstleistungen benötigt wird.

Nettoemission bzw. Global Warming Potenzial (GWP) misst den Ausstoß von CO₂-Äquivalenten.

Umweltbelastungspunkte, die in der Schweiz nach definierten Kriterien zur Entscheidungsfindung für Sammelsysteme und Verwertungspfade herangezogen werden [73].

Diese Bewertungssysteme können umweltrelevante Wirkungen gut quantifizieren, müssen jedoch im Einzelfall von Spezialisten erstellt werden und sind für Wirtschaftsakteure eher für strategische Entscheidungen nutzbar. Hilfreich sind sie in jedem Fall für die Internalisierung der externen Effekte, die in den ökonomischen Zielgrößen nicht berücksichtigt werden. Eine CO₂-Bepreisung ist so auch aus ökonomischer Sicht ein Schritt in die richtige Richtung.

Beispiel: Ein detaillierter Vergleich von noch nicht veröffentlichten Ökobilanzen, die für verschiedene Kunststoffverpackungen vom Institut *c7-consult* erstellt wurden, legt eine ca. 1,5 mal so hohe CO₂-Belastung bei 1 Liter-PET-Saftflaschen (Einweg, Grüner Punkt) gegenüber vergleichbaren PET-Mineralwasserflaschen (Pfandsystem) nahe. Dies ist in Tabelle 12 dargestellt. Es wurden verschiedene Gebinde und deren Gesamt-CO₂-Bilanz vorgestellt, jedoch aus Vergleichbarkeitsgründen nur die 1-Liter-Gebinde ausgewählt. Die Gebinde sind reale Markenartikel (Getränke). Mit durchschnittlich 92 g CO₂-

Equiv. schneiden die Gebinde in den Pfandsystemen deutlich besser ab als die Gebinde im Holsystem (142 g CO₂ Equiv.).

System	Gebinde	gCO ₂ -Equiv./l	System	Gebinde	gCO ₂ -Equiv./l
Saftflaschen: (Duales System)	PET 1 Liter A	163	Kohlensäurehaltige Getr. (Pfandsystem)	PET 1 Liter a	79
	PET 1 Liter B	144		PET 1 Liter b	95
	PET 1 Liter C	120		PET 1 Liter c	95
				PET 1 Liter d	98
Mittelwert		142			92

Tab. 13: Vergleich der CO₂-Bilanzen in verschiedenen Sammelsystemen³⁴

Gesellschaftliche Akzeptanz ist eher eine Randzielgröße, wird aber dann interessant, wenn von den Verbrauchern aktive Mitarbeit vorausgesetzt wird bzw. der Allgemeinheit Kosten der Erhöhung des Rezyklateinsatzes aufgebürdet werden müssen.

Lt. PwC, die im Jahr 2018 eine entsprechende Umfrage in Auftrag gegeben hatten, ist die Akzeptanz des Recyclings von Verpackungen in der Bevölkerung derzeit sehr hoch [74].

Dies dürfte sich jedoch allenfalls dann ändern, wenn der Umweltschutz wieder aus dem Fokus breiter Bevölkerungsschichten gerät, z. B. infolge akuter Notlagen wie Krieg oder Pandemien.³⁵

Hinsichtlich der technischen Umsetzung der Sammlung und Sortierung gibt es jedoch einen Zielkonflikt: Stehen zum einen getrennte und sichere Sammelsysteme für eine ganz bestimmte Kunststoffanwendung wie z. B. PET-Flaschen zur Verfügung, so können vergleichsweise einfach weitestgehend sortenreine (z. B. lebensmitteltaugliche) Rezyklate erzeugt werden. Dies bedürfte jedoch einer Reihe paralleler Sammelsysteme für jede weitere Kunststoffart. Das ist für die Abfallerfassung teuer weil platzintensiv und logistisch aufwendig. Zudem dürfte der Verbraucher unter den gegenwärtigen Bedingungen völlig überfor-

³⁴ Entnommen aus unveröffentlichten, unternehmensinternen CO₂-Bilanzen für verschiedene Produkte eines Herstellers von Kunststoffflaschen, erstellt vom Institut *c7-consult*.

³⁵ So rutschte lt. dem monatlichen ARD-Deutschland-Trend Mai 2022 binnen 5 Monaten der Klima- und Umweltschutz vom Problem Nr. 1 auf den Rang 3 hinter den Ukrainekrieg und die Inflation [75].

dert sein, die Sammelbehälter sortenrein zu beschicken. Fällt dagegen eine Vielzahl unterschiedlicher Kunststoffmaterialien für eine gemeinsame Gelbe Tonne an, so ist dies für die Verbraucher einfacher, der höhere Aufwand für eine marktfähige Rezyklatqualität wird dann jedoch auf die Sortierung und Nachbehandlung der Kunststoffe verlagert.

4.2.2.3 Bewertung der Effizienz von Sammelsystemen

1. Hauptkriterium für die Effizienzbemessung muss letztlich die Substitutionsquote für virgin-Kunststoffe sein in Verbindung mit den ökologischen, ökonomischen, sozialen und psychologischen Wirkungen. d. h. bspw., dass eine hohe Rezyklatquote nicht mit einer disproportionalen Steigerung des KEA bzw. des CO₂-Äquivalents erkaufte werden kann, fachliche oder finanzielle Grenzen beim Verbraucher nicht berücksichtigt oder etwa Umweltprobleme exportiert werden.
2. Das Kriterium Wirtschaftlichkeit der Sammelsysteme ist ambivalent: Müssen die Sammelsysteme bereits für sich Gewinne ermöglichen oder nur die Grundlage für die Wirtschaftlichkeit des gesamten Stoffkreislaufes schaffen, auch wenn die Erfassung für sich defizitär ist? Die Frage stellt sich für große Unternehmen wie z. B. Handelsketten mit Konzerntöchtern aus der SuV-Branche, die den gesamten Stoffkreislauf abbilden können, weniger als für Unternehmen, die ausschließlich das Sammeln und ggf. die Vorsortierung als Geschäftsgegenstand haben.
3. Nach den vorliegenden Veröffentlichungen (z. B. [67], [72], [76]) scheinen die Bringsysteme für Verpackungen, insbesondere Pfandsysteme, einen Vorteil gegenüber Holsystemen zu haben und eine entscheidende Rolle spielen zu können. Wichtigste Punkte sind:
 - a. Hohe bis sehr hohe Rücklaufquoten.
 - b. Hohe Reinheit der gesammelten Wertstoffe; weitgehender Verzicht auf Sortierung ist möglich, insbesondere bei Pfandsystemen.
 - c. Eine ökonomische und ökologische Vorteilhaftigkeit ist nicht abschließend bewertet, dennoch sind Hinweise auf eine hohe Effizienz der Bringsysteme zu sehen.
 - d. Störstoffe durch Sammlung können weitgehend ausgeschlossen werden.

Insbesondere Pfandsysteme sind in Europa auf dem Vormarsch, wie Abb. 15 darstellt.

Pfandsysteme in Europa

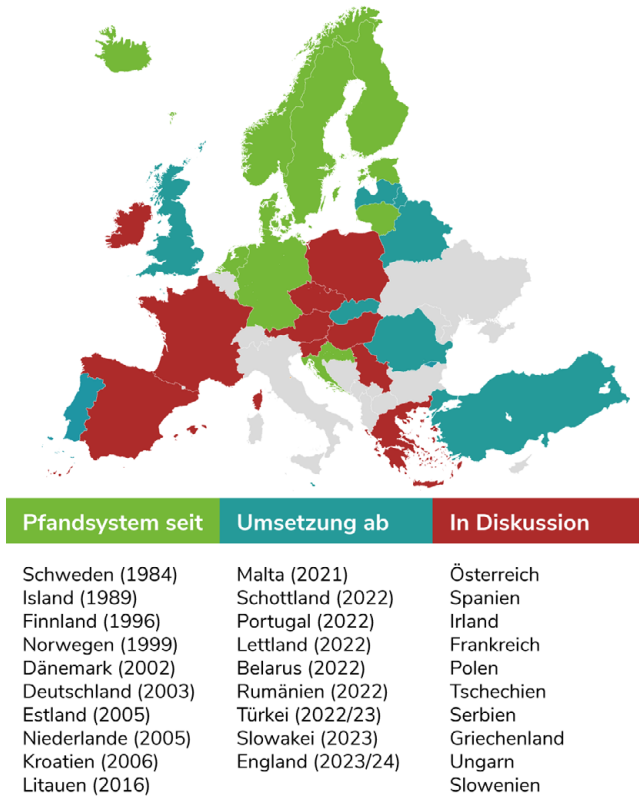


Abb. 15: Trend zu Verpackungspfandsystemen in Europa [77]

Verschiedene Sammelsysteme können gut nebeneinander funktionieren. Dies zeigt auch das Beispiel Deutschland, wo Mehrwegsysteme neben bepfandeten Einwegsystemen (Bringsysteme) und den Wertstoffsammelbehältern z. B. des Grünen Punkts (Holsysteme) existieren. Die bifa-Studie „Eine Ökoeffizienz- und Akzeptanzanalyse für Bayern am Beispiel Zweckverband für Abfallwirtschaft Kempten“ von 2013 ergab unter anderem, dass offensichtlich ein aus-

gewogener Mix zwischen Pfandsystemen + Wertstoffhof (Bringsysteme) + Gelber Sack (Holsystem) zur Steigerung der Sammelquote von Wertstoffen und zu einer hohen Akzeptanz unter den Verbrauchern beitragen kann. Durch Einführung der gemischten LVP-Erfassung im Bringsystem parallel zur Erfassung im Holsystem im Gelben Sack ließen sich die Sammelmengen an Wertstoffen im Vergleich zur sortenreinen Erfassung im Bringsystem durch Mobilisierung von weiteren Wertstoffanteilen aus dem Hausmüll steigern. Zugleich stieg allerdings auch die im Gelben Sack miterfasste Menge an Hausmüllbestandteilen, die als Reste aus der Sortierung einer Beseitigung zugeführt werden müssen [78].

Dennoch scheint vor allem die Ausweitung von Bringsystemen ein hohes Potenzial für bessere Rezyklat-Rohstoffe zu bieten. Dabei sind insbesondere die Pfandsysteme europaweit auf dem Vormarsch, offensichtlich weil dadurch – neben der Littering-Vermeidung – mit den höheren Rezyklatqualitäten auch eine höhere Wertschöpfung möglich ist.

Abb. 15 zeigt die Einführung von Pfandsystemen in verschiedenen europäischen Ländern. Die konkreten Ausprägungen sind durchaus unterschiedlich [79]. Es ist jedoch zu sehen, dass die meisten Pfandsysteme in den 2000er Jahren oder früher eingeführt wurden. Erst in den 2020er Jahren erhält das Thema im Zuge der europäischen Klima- und Umweltinitiativen eine neue Dynamik. Vorreiter ist Litauen, das bereits 2018 die höchste Recyclingrate pro Kopf der EU erreicht hatte [80].

Generell sind die Herangehensweisen innerhalb Europas beim Verpackungsrecycling recht unterschiedlich.³⁶ Die größte Übereinstimmung gibt es dabei in den Mitgliedsstaaten von *PRO Europe*, der internationalen Organisation des Grünen Punkts (Abb. 16).

³⁶ Siehe auch die sehr gute und kompakte Darstellung der DIHK „Umgang mit Verpackungen in Europa“ aus dem Jahr 2020 [81].

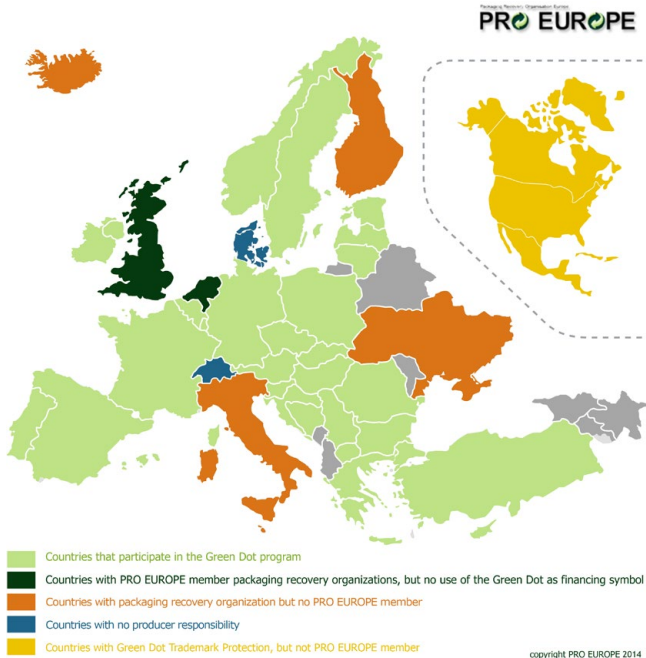


Abb. 16: Teilnehmerländer der EU am System Grüner Punkt [82]³⁷

Wie oben bereits beschrieben ist eine hohe Sammelquote für eine Erhöhung des Rezyklateinsatzes eine Voraussetzung, aber auf keinen Fall hinreichend. Insbesondere die Qualität der gesammelten Materialien spielt eine große Rolle.

Zwischenfazit:

Hinsichtlich der Sammelsysteme gibt es unterschiedliche Lösungsansätze, die alle eine Berechtigung haben. Holsysteme haben für den Verbraucher den Vorteil, dass er Abfälle leicht entsorgen kann. Die Sammelquoten sind hoch. Nachteil sind mögliche Kontaminationen und ein inhomogener Stoffmix. Bringsysteme haben den Vorteil, dass sie sortenreine Stoffströme ermöglichen. Der Aufwand ist jedoch hinsichtlich Logistik beim Verbraucher größer, sodass geringere Sammelquoten die Folgen sein können und mehr Kunststoffe in den Hausmüll gelangen.

³⁷ Zur europäischen Green-Dot-Organisation PRO Europe (Packing Recovery Organisation Europe) und den beteiligten Mitgliedsländern siehe [83].

Eine indirekte Bestätigung für eine hohe Effizienz von Bringsystemen ergibt sich aus vielen in den letzten Jahren durchgeführten Ökobilanzen für verschiedene Lebensmittelverpackungen, insbesondere für bepfandete PET-Einweg- und Mehrweggetränkeflaschen im Vergleich zu Einwegflaschen aus Glas und unterschiedlichen Kunststoffen, die in Sammelcontainern oder in der Wertstofftonne landen. Hier haben die größeren Verpackungseinheiten aus Kunststoff in der Regel einen geringeren ökologischen Fußabdruck [67], [84].

4.2.3 Kunststoffabfallaufbereitung und Recycling

Das Kunststoffrecycling dockt an verschiedene Sammelsysteme der unterschiedlichen dualen Systeme an:

Variante A) Gelbe Tonne/Gelber Sack mit Verpackungsmaterialien aller Art inkl. durchschnittlich 25 % per se nicht verwertbarer Fremd- und Reststoffe. Nach Cristiani/Beckamp, [24, S. 141], haben Kunststoffe einen Anteil von ca. 50 %, wovon ein Drittel durch die Rezyklathersteller nicht verwertbar ist (siehe Abb. 9, S. 39).

Variante B) LVP-Ballenware des Handels und von kommunalen Sammelstellen, wo Fremdstoffe, metall- und faserbasierte Wertstoffe sowie formstabile, kompakte Kunststoffteile und PET-Flaschen schon aussortiert wurden, so dass jede Kunststoffsortierfraktion separat weiter behandelt werden kann.

Aufbereitung

Basierend auf dem konkreten Erfassungssystem ist das jeweils nachfolgende System zur Aufbereitung der Kunststoffabfälle angepasst. Sind beispielsweise metallische Verpackungsabfälle (Alufolien, Weißblechdosen, Kunststoffverbunde mit Metallbeschichtungen etc.) in den Sammelbehältern vorhanden, muss – neben der Störstoffentfrachtung von Holz, Papier, Karton (HPK), Keramik, Glas, Steinen (KGS) etc. – eine Aussortierung von magnetischen und nichtmagnetischen Verpackungen für eine separate Verwertung erfolgen, bevor die eigentliche Sortierung der Kunststoffe einsetzen kann. Der Inhalt der meisten dualen Sammelsysteme enthält zudem mehr oder weniger stark verschmutzte, u. U. sogar kontaminierte Verpackungen, die mit der Stofftrennung einem Reinigungsprozess unterzogen werden müssen.

Eine typische Aufbereitungsanlage des dualen Systems gem. Variante A hat gewöhnlich die folgenden **Aufbereitungs- und Sortierstufen** (siehe Abb. 17):

1. optional: messerbewehrte Aufreißsysteme für Müllsäcke (beim System „Gelber Sack“) und
2. optional: händische Vorsortierung zur Aussonderung offensichtlicher sogen. „Fehlwürfe“
3. Siebsystem (Siebtrommeln, schwingende Siebbleche) mit verschiedener Sieblochgröße zur Trennung/Klassierung verschieden großer und schwerer Wertstoffe; hier werden größere und schwerere Verpackungen inkl. Getränkedosen von Leichtverpackungen und Folien getrennt.
4. Metallabscheider für eisenhaltige Abfälle (Magnete) sowie für Nicht-eisenmetalle (Wirbelstromabscheider)
5. Windsichter zur Absonderung von Tetrapacks, nicht auftrennbaren Mischkunststoffen (MKS) bzw. Mischpolyolefinen (MPO), nicht-polyolefinischen Kunststoff-Folien und polyolefinischen Folien sowie zur Abtrennung der recyclingfähigen Fraktion Papier-Pappe-Karton (PPK).
6. Anlagen mit einer zusätzlichen Sortierung der Kunststoffabfälle (KA) verfügen i. d. R. über eine Nahinfrarot-Sortierung (NIR) zur luftstrombasierten Trennung der Kunststoffe nach Typ, wobei schwarze Kunststoffe Typ-unabhängig ausgesondert werden, da NIR hier den Typ nicht detektieren kann. Dafür kann mittlerweile optional optoelektronische Sortiertechnik³⁸ als zusätzliche, allerdings teure Trennstufe nachgeschaltet werden, um auch schwarze Kunststoffe für das sortenreine Recycling erfassen zu können.

³⁸ Verfahren auf Basis hochauflösender Kameraaufnahmen mit Farberkennung zur Prüfung von Maßen, Oberflächen sowie von Materialeinschlüssen, Formtoleranzen etc. Neben der Kamera-Sensorik sind die Auswertungsalgorithmen der Software das entscheidende Know how solcher Technologienanbieter wie GREIWING (Separation AG), hamos (CIMBRIA-SEA) oder Bijlsma Hercules (GeJo Grading Services).



Die Weiterverarbeitung der vorkonditionierten Kunststoffe macht das folgende **Grundschema** zur Herstellung von PE-, PP- oder MPO-Granulat aus der abgetrennten Kunststofffolienfraktion deutlich:

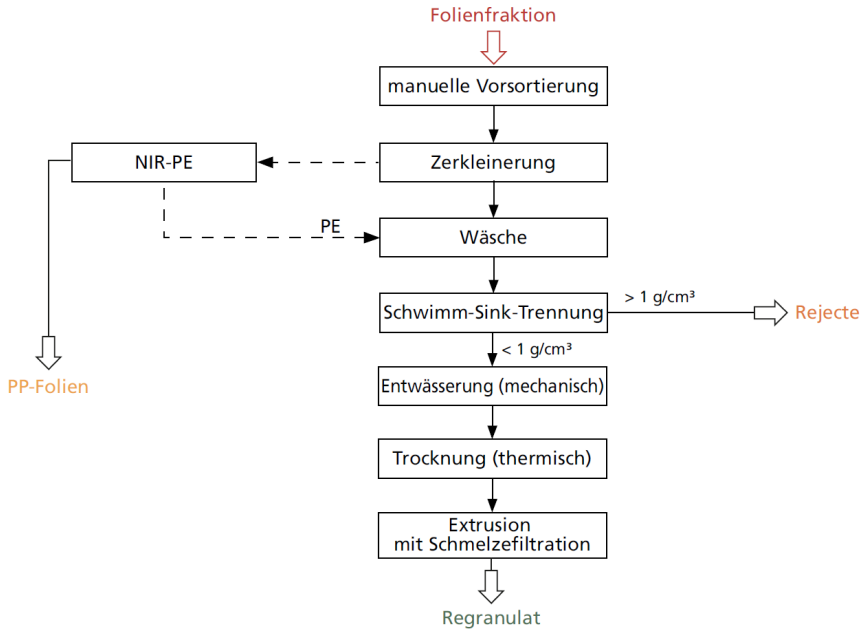


Abb. 18: Vereinfachtes Verfahrensschema des PP- und PE-Recyclings [24, S. 145]

Vor der Zerkleinerung erfolgt optional noch eine Magnetabscheidung des Bindedrahts der Ballen, um die Schneidmühlen vor unnötigem Verschleiß zu bewahren. Die Zerkleinerung erzeugt ein Mahlgut mit ca. < 10–15 mm. Der anschließende Waschprozess ist in der Regel nicht als Heißwäsche ausgeführt und erfolgt ohne Zugabe von Tensiden oder sonstigen Detergenzien. Die Abtrennung nichtpolyolefinischer Kunststoffpartikel³⁹ erfolgt mittels Schwimm-Sink-Sortierung (gravimetrische Sortierung) bei einer Trenndichte von 1 g/cm³. Das Verfahrensprinzip der Dichtentrennung kann in unterschiedlichen Maschinentypen umgesetzt sein; zur Anwendung kommen Schwimm-Sink-Becken, Sortierzentrifugen, Hydrozyklone usw. Die geringe Schüttdichte

³⁹ Kunststoffarten sind nur bedingt oder gar nicht miteinander zu vermischen, da für die Verarbeitung u. a. nah beieinander liegende Schmelzpunkte, Viskositäten, Dichten, kompatibles Vernetzungsverhalten etc. erforderlich sind. Daher ist eine Trennung in die Kunststofffraktionen im Rahmen des Recyclings zwingend. Polyolefine (PE, PP) haben eine Dichte < 1 g/cm³ und schwimmen im Wasch- und Trennvorgang auf, während PA, PET, PC und PVC mit Dichte > 1 g/cm³ die Sinkfraktion bilden. So können diese Fraktionen separat abgezogen und im Bedarfsfall weiteren Sortierungen mit anderen Trenntechnologien auf Basis NIR, elektrostatischer Aufladung oder optoelektronischer Detektion zugeführt werden.

von Folienmahlgut zwingt dazu, den Extruder mit speziellen Stopfwerkzeugen auszustatten oder eine Agglomeration vorzuschalten. Bei der Extrusion können je nach Kundenwunsch Zuschlagsstoffe wie Masterbatches, Kreide, Farbstoffe oder Flammschutzhemmer zudosiert werden. (Einer der Zielkonflikte für eine circular economy im Kunststoffbereich; funktionelle Zuschlagstoffe zur Erhöhung der Produktqualität vs. Verringerung der Recyclingqualität; s. auch Abschnitt 3.4.1)

Nach der Extrusion mit einer Schmelzefiltration (ca. 100 μm) und ggf. Homogenisierung erfolgt die Bereitstellung des Regranulats in der Regel in Big Bags [24, S. 145].

Der Folien-Input ist oftmals von großflächigem Format und besteht überwiegend aus LDPE. Für den Wiedereinsatz in Folienanwendungen sind enthaltene PP-Anteile ein limitierender Faktor, was einzelne Folienverwerter veranlasst, NIR-Trennstufen zur Minimierung des PP-Anteils hinter die Vorzerkleinerung zu installieren.

Das Grundscheema nach Abb. 18 ist vergleichbar mit den Verarbeitungssystemen für PET, für Polystyrol (PS) sowie für Hartkunststoffe aus PP, PE und MPO. Der wesentliche Unterschied besteht in der Schwimm-Sink-Trennung. Bei PO-Kunststoffen und PS wird die Schwimmfraktion zum Zielprodukt verarbeitet und bei den übrigen Kunststoffen die Sinkfraktion.

Besondere Ansprüche an die Herstellung von Rezyklaten (Geruchsoptimierung, Farbsortierung)

Die handelsfähigen Produkte des Recyclingprozesses werden als *Mahlgut*, *Agglomerat* (auch Kompaktat), *Regranulat* und *Regenerat* klassifiziert:

Mahlgut

ist letztlich zerkleinerter Kunststoffabfall einer Polymerart bzw. einer homogenen, monopolymeren Produktcharge mit einer Korngröße von 2–5 mm. Bei Folienmahlgut beträgt die Kantenlänge zwischen 20 und 50 mm. Je nach Qualität und Herkunft des Ausgangsmaterials kann Mahlgut bereits nach der 3. Stufe des Recyclingprozesses, also nach Zerkleinerung und Wäsche als Produkt aus dem Recyclingprozess ausgeschleust werden. Dies ist z. B. bei Post-

Industrial-Abfällen (PIA) üblich. Oftmals muss der Recyclingprozess aber auch bis zur 6. Stufe durchlaufen werden, d. h. nach diversen Sortierungen bis zur Trocknung.

Agglomerat (Kompaktat)

wird zumeist aus guten Qualitäten von Kunststofffolien hergestellt. Hier werden Folienstücke je nach Foliendicke von 10–100 cm² bis kurz unter den Schmelzpunkt erwärmt, so dass sich das flächige Material aufgrund der Oberflächenspannung verkugelt. Das Agglomerat ist dadurch ähnlich leicht zu transportieren und weiterzuverarbeiten wie ein Regranulat, hat aber nicht dessen Schüttdichte und schleppt oxidativen Sauerstoff, ggf. auch Feuchte und anhaftende Verunreinigungen mit in den Verarbeitungsprozess, sodass Agglomerate nur eine untergeordnete Rolle in der direkten Kunststoffverarbeitung spielen.

Regranulat

entsteht, wenn Mahlgut über einen Schmelzprozess zu einem kugelförmigen Regranulat mit einheitlicher Korngröße 2–4 mm und homogener, glatter Oberfläche verarbeitet wird. Am Ausgang der Aufschmelzextruder befinden sich Granulierlochplatten. Mit passfähigen, großflächigen Abschermessern werden die kleinen, noch sehr weichen bis zu 4 mm langen, zylinderförmigen Stücke i. d. R. in ein Wasserbad geleitet, wo das Material im Abkühl- und Erstarrungsvorgang zumeist in Kugelform übergeht und abgesiebt werden kann. Das Korn enthält faktisch keinen Staub und ist ähnlich einem Granulat aus virgin material problemlos verarbeitbar.

Regenerat

ist ein Regranulat, das aus Mahlgut, Agglomerat oder Regranulaten durch eine Zugabe von Additiven in einem Compoundierprozess, also einem zusätzlichen Aufschmelzschritt hergestellt wird und dadurch bessere, definierte Eigenschaften erhält.

Nach Reinheitsgraden werden **Abstufungen** unterschieden wie:

- *typenrein* (Aufarbeitung nur eines Kunststoffs eines Rohstoffherstellers mit derselben Typbezeichnung),
- *sortenrein* (Kunststoffe gleicher Kennzeichnung nach DIN EN ISO 11469 bzw. VDA 260, ggf. verschiedener Rohstoffhersteller),

- *sortenähnlich* (Kunststoffe stimmen in ihren Grundpolymeren überein, weichen aber in besonderen Eigenschaften, z. B. flammhemmende Zusätze, voneinander ab),
- *vermischt* (die Schmelzen unterschiedlicher Kunststoffe sind mischbar, z. B. ABS/PC oder PE/PP, und ermöglichen einen homogenen Formstoff mit den notwendigen mechanischen Eigenschaften und Oberflächen,
- *verunreinigt* (werkstoffliche Eigenschaften sowie Geruch und Farbe der Produkte sind beeinträchtigt; siehe auch [85]).

Der finale Aufschmelz- und Granuliertvorgang entscheidet wesentlich über die Qualität der Rezyklate. Infolge der beschriebenen, z. gr. T. inhomogenen Zusammensetzung der Ausgangskunststoffe haben die einzelnen Bestandteile von bis zu 10 K und mehr abweichende Schmelzpunkte und unterschiedliche MFI, auch wenn es sich nach außen hin um einen Monokunststoff handelt. Um ein vollständig aufgeschmolzenes, homogenes Granulat Korn zu erhalten, müssen Schmelztemperatur und Verweilzeit immer nach den Kunststoffteilen mit der höchsten Schmelztemperatur und dem niedrigsten MFI ausgerichtet werden. Dadurch kann es bei den Bestandteilen und Fremdstoffen mit niedrigerem Schmelzpunkt zu thermischen Zersetzungsprozessen oder oxidativen Verunreinigungen kommen, die beispielsweise als kurzkettige, gasförmige Emissionen auftreten. Diese sind nicht nur unmittelbar am Extruderausgang als lösemittelähnlicher Geruch wahrzunehmen, sondern setzen sich auch oft im Granulat selbst fest und sind mitunter sehr lange oder dauerhaft als qualitätsmindernde Eigenschaft vorhanden. Bis zu einem bestimmten Umfang ist dies durch eine Nachbehandlung zu beheben. Bei Rezyklaten, die in Recyclingpfaden auf Lösemittelbasis hergestellt werden, wie z. B. dem *Newcycling-Verfahren* der APK AG in Merseburg, geht es darum, jedes Mitschleppen von Lösungsmitteln zu verhindern oder durch die Nachbehandlung zu minimieren bzw. ganz auszuschließen [86].

Geruchseliminierung durch zusätzliche spezielle Additive, die Gerüche chemisch binden, ist grundsätzlich möglich, verschiebt aber das Problem nur auf den nächsten Gebrauchszyklus. Als für C2C geeignetere Methoden zur Geruchseliminierung stehen spezielle extrudergestützte Aufschmelzverfahren mit Entgasung für den finalen Extrusionsprozess zur Verfügung. So z. B. gibt es Hochleistungsextruder mit Absaugvorrichtungen an einzelnen oder allen

Schneckensegmenten, die über Entgasungsdome sowie aktive Belüftung vorwiegend leicht flüchtige, niedermolekulare Stoffe zu entfernen imstande sind. Wichtig bei diesen Extrudern ist zum einen eine Vergrößerung der Wärmeeintragsfläche auf Kunststoffseite, um damit auch die Ausgasungsfläche zu vergrößern. Zum anderen ist eine schnellstmögliche, ständige Erneuerung der Kontaktflächen Kunststoff/Extruderschnecken/Extruderwandung zu erreichen, um das Anracken (Vorstufe zur thermischen Depolymerisation) der Kunststoffe an den geheizten Kontaktflächen zu vermeiden.

„Desodorierung“ heißt die Entfernung flüchtiger Substanzen in einer zusätzlichen zweiten Extrudierung des Regranulats. Beide Extrusionsschritte können mit besonderen Wärmetauschermodulen gekoppelt werden, wo von den aufgeschmolzenen Sekundärkunststoffe bei der Wärmeaufnahme, der stationären Phase und bei der Wärmeabgabe die schwerer flüchtigen, hochmolekularen Verbindungen vom Rezyklat-Schüttgut unter Nutzung der Abwärme für eine gesteuerte Abkühlung abgeschieden werden.⁴⁰

Technische Ansätze für eine weitere Optimierung der Geruchseliminierung sind:

- ein D4R, das ein Einschleppen störender Fremdstoffe schon herstellerseitig in den Neuware-Kunststoff minimiert,
- hohe Trennschärfe bei den Sammelsystemen und den nachfolgenden Sortierstufen in den Verwertungsanlagen, sodass möglichst wenig Biomaterial in das Rezyklat gelangt,
- eine genaue Charakterisierung der Prozessbedingungen bei der Zerkleinerung, bei den Waschvorgängen sowie bei der Extrudierung, unter denen die Ausgangskunststoffe zur Ausgasung kommen,
- analytische Charakterisierung der Geruchsemissionen selbst, um rückwirkend das D4R, die Sortierung, die Verarbeitung der Kunststoffe zu Rezyklaten und insbesondere die Temperaturführung bei der finalen Extrusion genauer justieren zu können.⁴¹

40 Einzelne dieser Systeme sowie Systemkombinationen bietet z. B. die Fa. Coperion in Stuttgart an [87], in Wien ist die Starlinger Group mit vergleichbaren Technologien ansässig [88].

41 Am Fraunhofer-Institut IVV in Dresden läuft aktuell ein FuE-Projekt zur Geruchsoptimierung von Kunststoffrezyklaten mit den genannten vier Schwerpunkten [89].

Allgemein wäre aber eine Abtrennung oder Vermeidung geruchsentwickelnder Stoffe, insbesondere Biomaterial aus Lebensmittelresten, und deren Migration in den Kunststoff zu vermeiden.

Ausgehend vom Grundschemata für die werkstoffliche Aufbereitungsanlage gem. Abb. 18 [90, S. 145] können auch in Bezug auf die **Farbsortierung** theoretisch ein oder mehrere zusätzliche Sortierstufen integriert werden, indem nach der Trocknung aus der Schwimm-Sink-Trennung eine mehrstufige NIR-Sichtung zur Separierung der einzelnen Polymersorten und danach noch eine mehrstufige optoelektronische Farbsortierung vorgenommen wird.

Viele Jahre lang galt die Abtrennung dunkler Kunststoffe (dunkelgrau/braun/schwarz) als mit vertretbarem Aufwand technisch nicht machbar. Vor diesem Hintergrund erfolgt in der überwiegenden Anzahl der SuV-Betriebe noch immer die Aussortierung von werkstofflich brauchbaren, aber dunklen Kunststoffen in die Negativfraktion, die dann zumeist in die energetische Verwertung geht.

Mittlerweile ist über modernste optoelektronische Systeme nicht nur eine Klassifizierung dunkler Kunststoffe möglich, sondern sogar eine abschließende filigrane Produktkontrolle des Regranulats umsetzbar, wo jede farbliche Abweichung, jeder Fremdstoffeinschluss oder jede Anhaftung im Regranulat korngenau detektiert und ausgeschleust werden kann.⁴² Aufgrund der limitierten Ausgangsqualität der Input-Kunststoffe aus Gemischtsammlungen führen die Mehrkosten in der Regel aktuell jedoch nicht zu Qualitäten und Preisen des Regranulats, die eine Refinanzierung des erhöhten technischen Aufwandes ermöglichen. Vor diesem Hintergrund ist die Ausschöpfung des technologisch Machbaren bei dunklen Kunststoffen in den Aufbereitungsanlagen noch immer die Ausnahme.

Zwischenfazit:

Das werkstoffliche Recycling hat vom Stand der Technologie her gute Voraussetzungen, hochqualitative Rezyklate herstellen zu können. Die technischen Grenzen liegen zum einen in der inhomogenen Qualität, in der Kunststoff-

⁴² Siehe z. B. die belgische Separation Group [91] oder die Fa. Steinert in Köln [92].

alterung und der unzureichenden Sortiertiefe bei den Abfallgemischen. Diese Grenze kann durch ein konsequentes Design for Recycling sowie durch optimierte Sammelsysteme inkl. Mehrweg- und Pfandsysteme sowie Investitionen in moderne Sortier- und Verarbeitungstechnik nach oben verschoben, aber nicht prinzipiell verhindert werden. (Siehe nachfolgende Ausführungen zur Notwendigkeit des chemischen Recyclings.) Der mit jedem Materialumlauf im Kreislaufsystem zwangsläufig verbundenen Qualitätsminderung der Rezyklate wird bei der Kunststoffverarbeitung gewöhnlich mit einer Zumischung hochqualitativer Rezyklate oder virgin material und/oder Additiven entgegengewirkt. Zum anderen ist es die Diskrepanz zwischen dem durchschnittlichen technischen Ist-Zustand bei den SuV-Unternehmen⁴³ und dem technisch Machbaren, d. h. dem Investitionsstau aufgrund der beschriebenen rechtlichen, strukturellen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen.⁴⁴

Die Branche geht ansonsten überwiegend davon aus, dass grundsätzliche technische Innovationen bzw. alternative Verfahren zur weiteren Veredlung der Regranulate und zur Erweiterung der Anwendungsbereiche nicht evident seien.⁴⁵ Diese Auffassung bezieht sich vornehmlich auf Lösemittelverfahren und die Vakuumextraktion für eine hochwertige, werkstoffliche Verwertung von PE-/PP-Regranulaten sowie auf das chemische Recycling zur Generierung faktischer Neuware, da bis dato eine Branchenrelevanz nicht nachgewiesen sei. Ähnlich verhält es sich beim PET-Recycling, das aber aufgrund des etablierten Pfandsystems sowie einfach auszusortierender Einwegflaschen auf eine hohe Qualität des Ausgangsmaterials abstellen und bereits jetzt hochpreisige, lebensmittelgerechte Verpackungen und sonstige Produkte auf dem Niveau von virgin material sicherstellen kann [24, S. 145, 147].

43 Die Befragung unter SuV-Unternehmen sowie Kunststoffverarbeitern hat bei der Frage nach dem Stand der Technik in ihrem Unternehmen bzw. bei ihren Regranulat-Lieferanten eine Bewertung von 3,05 auf einer Skala von 1–5 ergeben. Das korrespondiert mit einem technischen Stand in der Branche, der den Benchmarks von vor 5–8 Jahren entspricht. (Siehe Befragung, Frage 14) Eine ausführliche Studie zum Stand der Technik beim Recycling von Kunststoffen hat das UBA 2021 veröffentlicht [26].

44 Auch bei PET ist bspw. chemisches Recycling technologisch möglich, siehe u. a. [93]. Aufgrund der hohen Quote beim werkstofflichen Recycling würden derzeit jedoch keine rentablen Mengen für entsprechende Investitionen zur Verfügung stehen.

45 Die Autoren der UBA-Studie sehen durchweg Potenziale für technische Weiterentwicklungen bei der Sortier- und der Verarbeitungstechnik im Rahmen des werkstofflichen Recyclings, aber keine Notwendigkeit für gänzlich neue oder alternative Verfahren [26, S. 112, 115, 118]. Siehe auch [90], [24, S. 144–152].

Chemisches Recycling

Das chemische Recycling wird häufig als „Allesfresser“ bezeichnet, sodass Kunststoffabfälle scheinbar unsortiert verwertet werden können. Dies ist jedoch nicht der Fall, auch wenn der Aufwand der Aufbereitung geringer ausfallen kann oder für ein hochwertiges werkstoffliches Recycling nicht mehr verwendbare Abfälle eingesetzt werden können. Sortier- und Trennprozesse sind also ebenfalls wie beim mechanischen Recycling vorzuschalten.

Chemisches Recycling ist definiert als jede Wiederaufbereitungstechnologie, die sich entweder direkt auf die Formulierung des polymeren Abfalls oder des Polymers auswirkt und diese in chemische Stoffe und/oder Produkte mit Ausnahme der Energierückgewinnung umwandelt, sei es für den ursprünglichen oder andere Zwecke (Definition der *European Coalition for Chemical Recycling*).

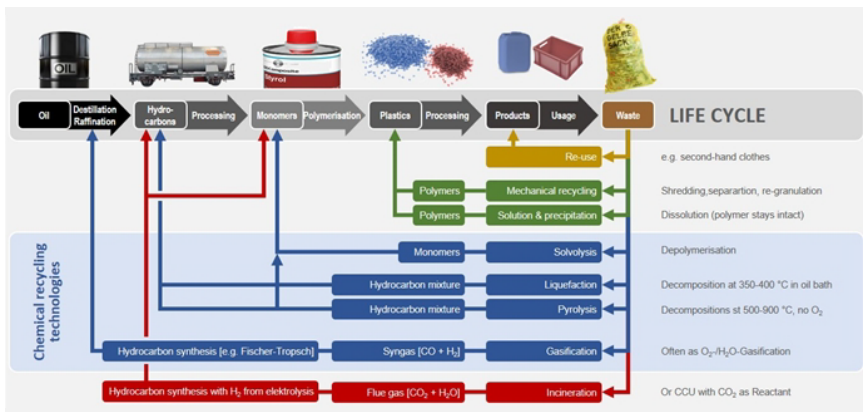


Abb. 19: Chemische Recyclingverfahren im Überblick [94]

Für das chemische Recycling von Kunststoffen können grundsätzlich alle Arten von chemischen und thermo-chemischen Depolymerisationsverfahren eingesetzt werden. Dies sind hauptsächlich Vergasung, Pyrolyse, Verölung und Solvolyse mit einem Startöl. Abb. 19 zeigt diese möglichen Prozesse der thermochemischen Depolymerisation und ihre Stellung innerhalb des Lebenszyklus von Kunststoffen. Neben technischen Unterschieden lassen sich die verschiedenen Technologien des chemischen Recyclings nach den verschiedenen Depolymerisationsprodukten einordnen.

Die **Solvolyse** führt zu Monomeren, die direkt im Polymerisationsprozess verwendet werden können. **Pyrolyse** und **Verflüssigung** führen hauptsächlich zu einem mehr oder weniger flüssigen Gemisch von Kohlenwasserstoffen, teilweise auch Monomere, die in den früheren Verarbeitungsschritten der Kunststoffherstellung verwendet werden könnten. Die **Vergasung** spaltet die Moleküle zu CO und H₂ auf, die wiederum als Synthesegas zur Produktsynthese verwendet werden können [94].

Das **lösungsmittelbasierte Recycling** mit einem maßgeschneiderten Lösungsmittel mit der anschließenden Ausfällung führt zu einem gereinigten Polymer. Füllstoffe und Fremdkunststoffe, die sich nicht auflösen lassen, werden so entfernt. Die Struktur des Polymers bleibt durch den physikalischen Prozess des Auflörens, Lösung und Fällung erhalten, so dass viele diesen Prozess nicht dem chemischen Recycling zurechnen. Die Verfahren *VinyLoop* und *Newcycling* sind solche Verfahrensansätze für das Recycling von Polyvinylchlorid (PVC) bzw. Polyolefin/Polyamid-Verbindungen. Der Erfolg dieser Prozesse hängt stark von der Qualität der Ausgangsmaterialien sowie dem Grad ihrer Vorbehandlung ab. Die Kunststoffabfälle sollten möglichst sortiert sein und möglichst wenig Verunreinigungen aufweisen. Zum Beispiel eine Anlage in Ferrara, die nach dem *VinyLoop*-Prinzip arbeitete, hat ihren Betrieb nach 16 Jahren einstellen müssen, weil das Rezyklat den Weichmacher Di-Ethylhexylphthalat (DEHP) enthielt, der jetzt in der EU verboten ist [94].

Im Gegensatz dazu werden bei der **Solvolyse** die Polymere chemisch in ihre Monomere oder Oligomere aufgespalten, die dann gereinigt werden und wieder zur Repolymerisation eingesetzt werden können. Die Voraussetzung ist, dass das Kunststoffpolymer chemisch aufgelöst werden kann. Typischerweise können für dieses Verfahren thermoplastische Polykondensate wie Polyester und Polyamid zu Monomeren verflüssigt werden. Bei diesem Verfahren werden die Polymerbindungen durch saure oder basische Hydrolyse (Umkehrung der Polymerisation) chemisch gebrochen oder durch Alkoholyse zum Ester gespalten. Auch hier können nur sortenreine Altkunststoffe umgewandelt werden. Das *Econyl*-Verfahren zum Beispiel stellt Caprolactam aus einem definierten Abfall her (gebrauchte Fischernetze aus Polyamid 6), das zu Werbezwecken bei der Herstellung von hochpreisiger Outdoor-Bekleidung verwendet wird [95, S. 84]. Die Einstufung dieser Prozesse als chemisches Recycling wird auf verschiedenen Ebenen kontrovers diskutiert.

Obwohl die **Pyrolyse** ein bekanntes Verfahren ist, das sich seit Jahrhunderten in der technischen Anwendung befindet, z. B. bei der Herstellung von Holzkohle oder Verkokung von Steinkohle, handelt es sich bei der Abfallbehandlung um eine relativ neue Technologie. Beim Kunststoffrecycling ist das Hauptprodukt nicht die Kohle bzw. der Koks, sondern die gasförmige und flüssige Fraktion, die zahlreiche verschiedene Kohlen-Wasserstoff-Verbindungen enthält. Die Anwendung der Pyrolyse für die Herstellung von Wertstoffen aus Kunststoffabfällen bringt zwei große Herausforderungen mit sich: Die Verwendung eines sehr heterogenen Ausgangsmaterials und die Behandlung der daraus gewonnenen minderwertigen gasförmigen und/oder flüssigen Produkte. In Kombination stellte dies in der Vergangenheit offenbar eine hohe Hürde dar, so dass es bisher nur wenige (halb-)industrielle Pyrolyseverfahren für Kunststoffe gibt [36], [94].

Gleiches wie bei der Pyrolyse gilt für die **Verölung**. Aktuelle Konzepte konzentrieren sich auf die dezentrale Depolymerisation von vorsortierten und aufbereiteten Kunststofffraktionen zur Herstellung von Ölen und Wachsen. Dazu werden die Pyrolyse-Dämpfe kondensiert und die Öle können als potenzielles Einsatzmaterial für die großen zentralisierten Steamcracker der chemischen Industrie (z. B. *Plastic Energy*, *Pyrum* und *Quantafuel*) dienen. *Quantafuel* produziert derzeit Pyrolyseöl für die Steamcracker der *Badischen Anilin und Soda Fabrik* (BASF). Die *Österreichische Mineralölverwaltung Aktiengesellschaft* (OMV) verwendet ebenfalls einen Teil des produzierten Öls aus ihrem ReOil-Projekt als Rohstoff. Die chemische Industrie hat ein Interesse daran, Öle aus Kunststoffabfällen zu verwenden, um den Rezyklateinsatz in ihren Produkten zu erhöhen, ohne die Produktionswege zu verändern. Dies liegt vor allem an der extremen Verdünnung der zurückgewonnenen, von der Norm abweichenden Öle in den nachgeschalteten Prozessen, so dass keine negativen Auswirkungen durch die Zugabe dieser Öle zu erwarten sind. Um größere Mengen an Pyrolyseöl im Steamcracker zu verwenden ohne negative Auswirkungen zu riskieren, muss das Pyrolyseöl hydriert, d. h. mit Wasserstoff beaufschlagt werden. Hochsiedende Verbindungen und Verunreinigungen müssen abgetrennt werden, um Betriebsrisiken zu vermeiden. Die im Pyrolyseöl enthaltenen Olefine müssen gesättigt werden, Heteroatome wie Stickstoff, Sauerstoff und Chlor werden als Ammoniak, Chlorwasserstoff und Wasser aus dem Pyrolyseöl entfernt [94].

Eine weitere Möglichkeit der Verflüssigung ist die Hydrierung unter hohem Druck, die gesättigte Produkte mit einer geringen Anzahl von Heteroatomen erzeugt. Die verwendeten Drücke liegen zwischen hundert und mehreren hundert bar und die Temperaturen zwischen 300°C und 450°C. Das Hydriermittel H_2 führt zu einer vergleichsweise hohen Produktqualität, allerdings bei hohen Betriebskosten. Dies mag ein Grund dafür sein, dass derzeit keine industriellen Beispiele bekannt sind für die Anwendung dieses Verfahrens im Kunststoffrecycling. Dennoch wurde dieses Verfahren bei der *Vereinigte Elektrizität- und Bergwerks AG* (VEBA) in den 1990er Jahren bei 100 bar und 400–450°C in einer Anlage für 80.000 Tonnen pro Jahr ausgelegt (Heyde und Kremer, 1999). Ein neuer Ansatz mit katalytischer Hydrierung unter hydrothermalen Bedingungen wird von *Licella* entwickelt (CAT-HTR-Technologie) [22], [94].

Einer der Rohstoffe, der in der chemischen Industrie hauptsächlich für die Herstellung einer Vielzahl von verschiedenen Produkten genutzt wird, ist **Synthesegas**, ein Gemisch aus H_2 und CO. Im Sinne einer Kreislaufwirtschaft ist der Ansatz zur Umwandlung von Kunststoffabfällen in ein solches Synthesegas mittels Vergasung ein naheliegender. Allerdings ist es eine technische Herausforderung, aus Abfallstoffen ein hochwertiges Synthesegas zu erzeugen. Werden vorbehandelte Abfallfraktionen oder gar vorsortierte Kunststofffraktionen als Ausgangsmaterial für die Vergasung verwendet, kann ein akzeptables Synthesegas erzeugt werden, das aber wahrscheinlich noch aufwendig und kostenintensiv aufbereitet werden muss, bevor es als Rohstoff in der chemischen Industrie verwendet werden kann. Daher werden solche Anlagen unter den derzeitigen Marktbedingungen voraussichtlich nicht wirtschaftlich sein [94].

Da die Recyclingziele für Kunststoffe sehr ehrgeizig und auch derzeit durch werkstoffliches Recycling kaum erreichbar sind, werden viele alternative thermische Abfallbehandlungsverfahren, auch das chemische Recycling, als zusätzliche Option zum mechanischen Recycling diskutiert. Eine abschließende und endgültige Bewertung dieser Technologien auf der Grundlage der verfügbaren Daten steht noch aus. Es ist klar, dass die Zusammensetzung des Abfalls, die Menge an Störstoffen im Ausgangsmaterial und der damit verbundene Verarbeitungsaufwand der Produkte zunimmt. Schon geringe Mengen an problematischen Inhaltstoffen können zum Ausfall eines ganzen Prozesses führen. Die Ausbeute und die Produktzusammensetzung können auch durch verschie-

dene Zusatzstoffe, die im Kunststoffabfall enthalten sind, negativ beeinflusst werden. Grundlegende Herausforderungen für das chemische Recycling sind der Eintrag von heterogenen Kunststoffabfällen in das System, die Entfernung von Halogenen, der Wärmeeintrag in das Reaktorsystem, die Produkttrennung oder die Vermeidung einer Repolymerisation von Produkten.[22]

Chemisches Recycling sollte nur für solche Kunststoffabfälle in Betracht gezogen werden, die nicht mechanisch recycelt werden können oder als Minderqualität aus dem werkstofflichen Recycling ausgeschleust werden, aber für eine thermische Verwertung noch zu gut sind. Das trifft z. B. auf getrennt gesammelte PO-Kunststoffe mit der Abfallschlüssel-Nr. AVV 200239 oder für das DSD-Verpackungsmaterial AVV 150106 zu.

Zugleich wird ein großer Teil unseres derzeitigen Energiebedarfs immer noch durch die Verbrennung von Öl und Gas gedeckt, die auch als Ausgangsstoffe für die chemische Industrie geeignet wären und weniger aufwändige Vorbehandlungen erfordern als chemische Verwertung. Daher stellt sich die Frage – zumindest solange wir nicht nur Energie aus erneuerbaren Quellen bereitstellen – warum wir diese Brennstoffe nicht für die Herstellung von Kunststoffen verwenden und stattdessen die nicht mehr stofflich verwertbaren Kunststofffraktionen zur energetischen Nutzung bereitstellen. Dies muss diskutiert werden, vor allem, solange der Aufwand für die derzeit vorgeschlagenen chemischen Verwertungswege noch nicht erkennbar ist [94].

Zwischenfazit:

Das chemische Recycling ermöglicht durch unterschiedliche Technologien vom Ansatz her, dass die Polymere in ihre Monomere oder andere chemische Crackprodukte zerlegt werden. Fremdstoffe, Kunststoffbestandteile (Additive) usw. können durch die chemische Aufbereitung ausgeschleust werden, sodass daraus wieder Virgin-Grade-Kunststoffe herstellbar sind. Der Energieaufwand für das chemische Recycling ist deutlich höher als beim mechanischen Recycling und kann nur dann gerechtfertigt werden, wenn kontaminierte Abfallströme, die für das mechanische Recycling nicht in Frage kommen, aber stofflich genutzt werden können. – Und unter der Voraussetzung, dass zugleich die Wirtschafts-, Energie- und Ökobilanzen besser als bei der thermischen Verwertung sind.

Beim chemischen Recycling fallen chemische Zwischenprodukte wie Synthesegas, Pyrolysegas und/oder Pyrolyseöle an, die teilweise Gefahrenstoffe wie Chlorwasserstoff, polyaromatische Kohlenwasserstoffe (PAKs) oder sogar Dioxine enthalten. Dies wird von Umweltverbänden häufig kritisiert [58]. Das bedeutet, dass die Produkte und Nebenprodukte gemäß Gefahrenstoffverordnung, REACH usw. sicher gehandhabt werden müssen, was für chemische Betriebe eine Selbstverständlichkeit ist. Bei dezentralen Nutzern dieser Technologien, die nicht mit den Sicherheitsregelwerken vertraut sind, sollte besonders auf eine strikte Einhaltung geachtet werden.

Die Gefährlichkeit der entstehenden Schadstoffe hängt dabei stark von der Art und Qualität der Kunststoffabfälle ab. Werden z. B. PVC-haltige Abfälle thermisch pyrolysiert, so ist mit grenzwertrelevanten Konzentrationen an Dioxinen oder polyaromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK) zu rechnen. Werden hingegen chlorarme Abfallfraktionen (z. B. Sortierfraktion 352 Grüner Punkt) verwendet, dann ist das Gefahrstoffpotenzial deutlich niedriger. Kurz gesagt: Kommen gefahrstoffbildende Abfälle in den Prozess hinein, dann kommen auch mit großer Wahrscheinlichkeit schadstoffbeladene Chemikalien aus dem Prozess heraus, mit denen es sicher umzugehen gilt.

Für das häufig genannten Argument, dass das chemische Recycling durch Pyrolyse und Vergasung eine universelle Verwendung von Kunststoffabfällen in Neuware-Qualität ermöglicht, steht jedoch noch ein zuverlässiger Nachweis aus. Klärung soll u. a. eine UBA-Studie zur Abschätzung der Potenziale und Bewertung der Techniken des thermochemischen Kunststoffrecycling (FKZ 3720 34 302 0) bringen.

Zusätzlich muss der Aufwand für Produktaufbereitung, Schadstoffentstehung und ökologischen Nutzen vertretbar sein. Üblicherweise müssen die Kunststoffabfälle auch beim chemischen Recycling, wenngleich weniger spezifisch als beim mechanischen Recycling, aufbereitet und die Störstoffe abgetrennt werden. Ist dies nicht der Fall, so kann es zu gravierenden Problemen im Betrieb der Anlagen und/oder in der Qualität der Produkte kommen [22], [96, S. 83–115]. Der Aufwand der Abtrennung hängt wiederum vom verwendeten Kunststoffabfall ab.

In manchen Bereichen ermöglichen eine zielgerichtete Sammlung von ausgewählten Abfällen und die hochpreisige Vermarktung der Recyclingprodukte

die erfolgreiche Anwendung chemischer Recycling-Technologien, z. B. der bereits erwähnte *Econyl*-Prozess von *Aquafil* – *VAUDE*, eine Hydrolyse zur Verarbeitung von Fischernetzen und Textilien [94, S. 5].

Hinsichtlich der Effizienz aller Recyclingtechnologien (mechanisches und chemisches Recycling) sollten prinzipiell also möglichst reine, recyclinggerechte Kunststoffprodukte bzw. Abfallströme erzeugt werden, da so der Aufwand zur Aufarbeitung der Einsatzstoffe und der Produkte sowie das Prozessrisiko der Recyclingverfahren reduziert wird [22, S. 146].

4.3 Bewertung von Recyclingpfaden – was macht wann Sinn?

Hinsichtlich einer Technologiebewertung muss nicht nur die allgemeine technische Möglichkeit, sondern auch die Technologiereife, die ökologische Sinnhaftigkeit und Wirtschaftlichkeit betrachtet werden.

4.3.1 TRL – Die Technologiereife

Eine technologische Bewertung muss immer anhand einer gesamten Prozesskette unter Berücksichtigung aller Rahmenbedingungen erfolgen. Als Bewertungsmaßstab hat sich im Ingenieurwesen das 9-stufige TLR-System (Technology Readiness Level) etabliert [97]:

- TRL 1: Beobachtung und Beschreibung des Funktionsprinzips (8–15 Jahre)
- TRL 2: Beschreibung der Anwendung einer Technologie
- TRL 3: Nachweis der Funktionstüchtigkeit einer Technologie (5–13 Jahre)
- TRL 4: Versuchsaufbau im Labor
- TRL 5: Versuchsaufbau in Einsatzumgebung
- TRL 6: Prototyp in Einsatzumgebung
- TRL 7: Prototyp im Einsatz (1–5 Jahre)
- TRL 8: Qualifiziertes System mit Nachweis der Funktionstüchtigkeit im Einsatzbereich
- TRL 9: Qualifiziertes System mit Nachweis des erfolgreichen Einsatzes

Hinsichtlich des mechanischen Recyclings kann prinzipiell von einem Technologiereifegrad von 9 ausgegangen werden. Aber auch hier hat das Abfallmaterial einen entscheidenden Einfluss auf die Qualität des Produkts, sodass bestimmte Produkte allein aus dem mechanischen Recycling nicht herstellbar sind.

Eine der größten Hürden für große Mengen und hohe Qualität von recyceltem Kunststoff, die Komplexität des **Verpackungsdesigns**, führt zu unzähligen Verpackungsformaten mit vielen Materialkombinationen. Demgegenüber kann die Sortiertechnik auf der End-of-Use-Seite nur einige wenige Eigenschaften erkennen (wie 3D- vs. 2D-Formen, unterschiedliche Größen oder unterschiedliche Infrarot-Absorption für verschiedene Polymere und/oder VIS zur Farberkennung). Es gibt mehrere Beispiele, bei denen das Design der Verpackung den Sortierprozess und damit das ganze Recycling für ein Abfallprodukt unterbricht, indem es ein Produkt entweder „unsichtbar“ macht (z. B. können dunkle Kunststoffe von den meisten im Einsatz befindlichen IR-Sensoren nicht detektiert werden) oder zu falschen positiven/negativen Ergebnissen führt (z. B. die negative Sortierung einer PET-Flasche mit Vollsleeve, weil die Hülle typischerweise aus einem anderen Material besteht, was bedeutet, dass das PET als solches nicht erkannt wird) [98].

Angeichts eines Anteils von rd. 50 % der thermischen Verwertung von Kunststoff-CLP ist daher die TRL 9 zu relativieren. Ein Beispiel, die Geruchsentfernung bzw. -reduzierung von Rezyklaten, sei hier erwähnt. Durch eine geeignete Behandlung von geeigneten Einsatzstoffen ist eine sehr gute Geruchsreduzierung technisch möglich (TRL 9). Setzt man aber stark verunreinigte Einsatzstoffe ein, so kann man mit akzeptablem Aufwand kaum geruchsfreie Rezyklate herstellen (siehe ebenda S. 73 f.). Ähnliches gilt für lösemittelbasierte Recyclingverfahren.

Technology	Scale of operation (at present)	Temperature (C) (in process)	Sensitivity (to feed-stock quality)	Polymer break-down (affecting yield and material recovery)	TRL
Conventional pyrolysis	Commercial	300–700	High	Moderate	9
Plasma pyrolysis	Laboratory	1800–10000	Low	Very detailed	4
Microwave assisted pyrolysis	Laboratory	Up to 1000	Medium	Detailed	4
Catalytic cracking	Commercial	450–550	High	Moderate	9
Hydro-cracking	Pilot	375–500	High	Detailed	7
Conventional gasification	Commercial	700–1200	Medium	Detailed	9
Plasma gasification	Commercial in decomposing hazardous waste	1200–15000	Low	Very detailed	8
Pyrolysis with in-line reforming	Pilot	500–900	Medium	Detailed	4

Tab. 14: TRL nach Solis et al. [99]

Auch beim chemischen Recycling muss die gesamte Prozesskette bewertet werden. Besonders muss dabei auf die Qualität des Abfallmaterials und der zu erzielenden Produkte hingewiesen werden. Eine Abfallpyrolyse z. B. kann technisch sehr gut und stabil laufen (TRL 9 Pyrolyse Burgau⁴⁶), jedoch muss der Gesamtprozess bis hin zu verwertbaren Produkten noch nicht diese Technologiereife besitzen. Die Tabelle 14 aus Solis und Silveira [99, S. 135] zeigt für das chemische Recycling TRLs auf. Für die Vergasung und konventionelle

⁴⁶ Die Müllpyrolyseanlage Burgau auf Basis der Drehrohrofentechnik wurde 1985 errichtet und behandelte den gesamten im Landkreis Günzburg anfallenden Haushaltsmüll von 100.000 Einwohnern, hausmüllähnlichen Gewerbemüll, Sperrmüll sowie größere Mengen Klärschlamm. Die Pyrolyse arbeitete im Temperaturbereich von 600 °C. Das Pyrolysegas wurde thermisch verwertet, der Schmelzkoks z. T. als Reduktionsmittel in der Stahlherstellung eingesetzt. Aufgrund der Abfallzusammensetzung war ein erheblicher Aufwand für die Rauchgasreinigung erforderlich. Ein Großteil des Schmelzkokes musste wegen Kontamination deponiert werden und war mit Wirksamwerden der TASI 2005 nur als Abfall kostenpflichtig thermisch zu entsorgen. Die Schließung der Anlage Ende 2015 erfolgte letztlich jedoch ausschließlich aus rein wirtschaftlichen Gründen, da dieselbe Abfallmenge in einer MVA mit rd. 25 % weniger Kosten verwertet werden konnte. Eine stoffliche Verwertung der Pyrolysegease für die Herstellung von chemischen Syntheseprodukten war nie das Ziel und wäre auch nur mit zusätzlichem hohen Aufwand möglich gewesen (siehe [100], [101]).

Pyrolyse müssen dennoch der Aufbereitungsaufwand, die Empfindlichkeit gegenüber Schwankungen im Einsatzstoff und die Auswirkung auf die Qualität der Produkte hinterfragt werden. Eine BKV-Studie schlüsselt dies nach einzelnen Prozessschritten (Tabelle 15) auf, sodass auch hier die Produktaufbereitung als Haupthindernis angesehen wird. Eine Abhängigkeit vom Einsatzstoff hin zur Produktaufbereitung besteht, da der Produktaufbereitungsaufwand vom Eintrag an Störstoffen abhängt.

Die Untersuchung dieser Thematik ist ebenfalls Gegenstand der erwähnten UBA-Studie zum chemischen Recycling (Abschätzung der Potenziale und Bewertung der Techniken des thermochemischen Kunststoffrecycling, FKZ 3720 34 302 0).

Process	Pretreatment Feedstock	Conversion	Upgrading Rawgas/crude	Product utilization
Fixed Bed Gasification (BGL)	9	8	7	MeOH- ¹⁾ Synthesis
Fluidized Bed Gasification (CFB)	9	8–9	7	MeOH-Synthesis
Synthesis EntrainedFlow Gasification (EFG)	5–6	6	9	MeOH-Synthesis
Pyrolysis	9	5–6	3	Steamcracker

1) MeOH – methanol

Tab. 15: TRL chemischer Recyclingverfahren nach BKV [102, S. 3]

Zwischenfazit:

Beim mechanischen Recycling stehen grundsätzlich geeignete Technologien für hohe Rezyklatqualitäten bis zur TLR 9 zur Verfügung, der Technologiereifegrad muss sich aber immer an den Anforderungen des Produkts und an der verwendeten Einsatzstoffqualität messen lassen. Daraus lässt sich ableiten, dass die Sicherung einer hohen Qualität der Abfälle als eine der entscheidenden „Stellschrauben“ für eine hohe Wirksamkeit der Sortier- und Verarbeitungstechnologien sowie für eine hohe Produktqualität bei den Rezyklaten anzusehen ist.

Beim chemischen Recycling zur Herstellung von Rohstoffen für die Kunststoffproduktion sind nach Auffassung des Gutachterteams aktuelle Pilotprojekte, z. B. vom Ölkonzern OMV, mind. der TLR 8 zuzuordnen, ebenso die Pyrolyseanlagen von *QuantaFuel/BASF*, *RES Polyflow/BP*, *DOW/Fuenix Ecogy*, *Neste*, *Llyondellbasell*, *Ineos/Agilyx* [22, S. 55].

Depolymerisationsverfahren wie die von *Diesel-West* [103] oder der *Biofabrik Dresden* [104] wären bei TLR 6–7 einzuordnen. Vergasungstechnologien zur Gewinnung von Synthese-fähigen Monomeren, z. B. von *Kopf SynGas* (Klärschlammpyrolyse [105]) oder *Lurgi* (Druckvergasung von Kohle [106]), gehen bis zur TLR 9. Lösemittelverfahren wie das der *APK AG* [86] liegen ebenso bei TLR 8. Aber auch hier besteht bei allen genannten Beispielen die Abhängigkeit der Produktqualität von der Qualität der Ausgangsrohstoffe sowie der Aufbereitungsqualität der Kunststoffabfälle.

Bedingungen für einen wirtschaftlichen Betrieb von chemischen Recycling-Anlagen, die in Bezug auf die Anforderungen an Reinheit und Qualität von Vorteil sind gegenüber den werkstofflichen Recyclingprozessen, sind u. a.:

- Stabil hohe Ölpreise
- Kontinuierliche Verfügbarkeit in entsprechender Qualität (Einfluss der Gesetzgebung auf Abfallströme mitbedenken)
- Gute Sammel- und Sortierstrukturen müssen vorliegen (Elektroschrott/Bauabfälle im internationalen Kontext – bislang zu wenig genutzte Quellen für Kunststoffabfälle; gleichzeitig bietet das chemische Recycling völlig neue Ansätze zur Rückgewinnung der seltenen Metalle aus dem Elektronikschrott)
- Passende Infrastruktur – Andocken an Weiterverarbeitungsstufen ist wichtig (Einschleusen der flüssigen und gasförmigen Produkte aus dem chemischen Recycling in die vorhandenen Prozessstufen der Erdölraffinerien)
- Bürokratiekosten (Umgang mit und Entsorgung von toxischen Substanzen; Einhaltung strikter Regeln des Arbeits- und Umweltschutzes) [58].

Inwieweit eine bestimmte Verwertungsrouten letztlich sinnvoll ist, hängt zunächst grundlegend davon ab, welche Mengen an Abfällen zur Verfügung stehen und welche Qualitäten sie aufweisen. Danach entscheidet die Technologiereife (einschließlich des Nachweises einer besseren CO₂-Bilanz), ob zwischen

dem werkstofflichen Recycling und der Verbrennung noch Technologien des chemischen Recyclings die Verwertungskaskade optimieren können.

Langfristig werden sich auch zusätzliche Einsatzbereiche für Rezyklate erschließen, die besonders für jene Teile des Stoffstroms interessant sind, die nicht durchgängig im Kreislauf geführt werden können. Nach einem Vorschlag zur „Renewable Carbon Initiative“ von mehr als 30 namhaften Unternehmen soll die Verwendung von alternativen Carbon-Quellen für den Fortbestand der organischen Chemieproduktion gefördert werden, um den Kern des Klimaproblems, verursacht durch den extrahierten fossilen Kohlenstoff aus dem Boden, zu bekämpfen. Die alternativen Kohlenstoff-Quellen zur Deckung des Bedarfes der Industrie z. B. für Brennstoffe, kohlenstoffhaltige Chemikalien und Polymerwerkstoffe können sein: Biomasse, CO₂ und C-haltige Polymere aus dem Recycling-Prozess [113]. Die Initiative wurde 2020 gegründet, um die Chemie- und Werkstoffindustrie gemeinsam in die Lage zu versetzen, die enormen Herausforderungen bei der Erfüllung der Klimaziele der EU und der Nachhaltigkeitserwartungen der ganzen Welt anzugehen.

Wie bereits im Abschnitt zur Technologiereife des mechanischen Recyclings ausgeführt, ist eine 100 %-Kreislauffähigkeit von Verpackungen aus Kunststoff nicht gegeben. Die Option einer Verwertung der „Reste“ in Form einer alternativen Kohlenstoffquelle über das chemische Recycling stellt jedoch eine vielversprechende Zukunftsvision dar.

4.3.2 Lebenszyklusanalyse (LCA)

Hinsichtlich der Recyclingpfade existieren unterschiedliche ökobilanzielle Betrachtungsansätze. Diese sind sehr stark von den herangezogenen Rahmenbedingungen geprägt. Grundsätzlich unterscheidet man bei der LCA-Definition zwischen dem Blickwinkel der Abfallentsorgung und dem der Herstellung von Rezyklaten, also welche Entsorgungsweise am umweltschonendsten ist (Umweltauswirkungen pro Masse Abfall), bzw. wie man mit dem geringsten CO₂-Fußabdruck Recyclingkunststoffe herstellen kann (Umweltauswirkung pro Masse Recyclingkunststoff). Letztere Betrachtungsweise muss auch eine Berücksichtigung der Produktqualität beinhalten [107, S. 91].

Der zweite große Unterschied betrifft die eingesetzte Abfallzusammensetzung und die Zuordnung zu entsprechenden Verfahren. Nimmt man gemischte Kunststoffverpackungen als Ausgangsstoff an, so wird dieser anteilig unterschiedlichen Verwertungswegen (mechanisches, ggf. chemisches Recycling und/oder der Verbrennung) zugeordnet.

Darüber hinaus müssen Stoff- und Energiebilanzen der jeweiligen Verfahren bekannt sein. Häufig sind diese Daten nur bedingt zugänglich, weil sie Rückschlüsse auf die Verfahren selbst erlauben und dieses Know how geschützt werden (oder ein möglicher Wettbewerbsnachteil kaschiert werden) soll. Zudem sind vergleichende Bilanzen aufgrund der Komplexität der Einflussfaktoren bei jedem einzelnen Verfahren methodisch oft schwierig zu erstellen.

Betrachtet man einzelne Recyclingpfade, so gibt es keine Zweifel, dass das mechanische Recycling, sofern technisch möglich, der umweltschonendste Recyclingpfad ist ([108, S. 5], [109, S. 18 f. supplementary material 2]). Das bedeutet, dass Kunststoffabfälle möglichst zuerst dem mechanischen Recycling und nur Restfraktionen dem chemischen Recycling zugeführt werden sollten.

In Tabelle 16 sind Energieaufwand und THG-Emissionen in unterschiedlicher Aufschlüsslung dargestellt. Neben der Sortierausbeute für das mechanische Recycling sind diese Emissionen als Gesamtbilanz mit und ohne thermische Verwertung sowie unter Berücksichtigung der Gutschrift für die Einsparung der Neuwarenproduktion aus fossilen Rohstoffen durch Rezyklatverwendung ausgewiesen. Als Bewertungskriterium werden hier die letzten beiden Spalten herangezogen, weil Gutschriften durch die thermische Verwertung der Sortierreste je nach Herangehensweise das Ergebnis verzerren.

Je höher der Anteil des mechanischen Recyclings an der Sortierausbeute, desto weniger Treibhausgasäquivalente und desto weniger Energie wird benötigt (Aufwand => Gutschrift für die Substitution von Primärmaterial). (In Tabelle 16 ist das Szenario 1.1 -42 % mechanisches Recycling, Rest thermische Verwertung besser als 1.2 -22 % mechanisches Recycling, Rest thermische Verwertung sowie das Szenario 3.1 -42 % mechanisches Recycling, Rest chemisches Recycling besser als 3.2 -22 % mechanisches Recycling, Rest chemisches Recycling).

Der ökologische Fußabdruck hängt mithin entscheidend von der Sortierausbeute und damit von der Ausgangsqualität der Kunststoffabfälle ab. Inwieweit schwer recyclingfähige Fraktionen (z. B. Sortierteste, die dann nur thermisch genutzt werden können) anfallen und damit dem mechanischen Recycling nicht zur Verfügung stehen, zeigt Abb. 9 (S. 39). Aktuell sind in LVP-Abfällen ca. 50 % Kunststoffe enthalten. Ca. 2/3 des Plastikabfalls ist gut mechanisch, 1/3 ist schlecht recyclebar [90, S. 140]. Um diesen Rest und weitere Kunststoffabfälle stofflich zu verwerten statt zu verbrennen, kann wie beschrieben das chemische Recycling eine Lösung sein. Am besten schneidet hinsichtlich der Treibhausgasemissionen bei Volk et al. [109] deshalb eine Kombination aus mechanischem und chemischem Recycling mit hohem Anteil an mechanischem Recycling ab.

Szenario	Sortierausbeute f. mech. Recycling	gesamt (mit Gutschriften)		prozessbedingt (ohne therm. Verwertung)		Gutschrift Sub- stitut. von Primär- material	
		CO ₂ / Input	Energie/ Input	CO ₂ / Input	KEA	CO ₂ / Input	Energie/ Input
	%	kge/kg	MJ/kg	kge/kg	MJ/kg	kge/kg	MJ/kg
1.1	42	0,25	-21,96	0,07	1,1	-0,49	-16,81
1.2	22	0,66	-11,22	0,06	0,89	-0,25	-5,06
2	0	0,25	-31,58	0,87	16,21	-0,71	-15,92
3.1	42	-0,22	-40,22	0,55	10,14	-0,9	-30,14
3.2	22	0,01	-35,98	0,71	13,15	-0,81	-23,14

Tab. 16: CO₂-Äquivalente und KEA in Abhängigkeit der Sortierausbeute und dem Einfluss des chemischen Recyclings nach Volk et al. [109, S. 18 f. S2 Anhang A1]

Aus dem Vergleich von Volk et al. [109] mit einer vom UBA beauftragten Studie [26, S. 135 ff.] ergeben sich für das mechanische Recycling beim KEA größere Abweichungen, während die THG-Emissionen ähnlich ausfallen. Das UBA [26, S. 94] gibt für die Aufbereitung von Mischkunststoffen bis hin zu Mischkunststoff-Agglomerat/PO-Agglomerat/Mischkunststoff-Regranulat 350/570/580 kWh/t (1,3–2,0 MJ/kg), also einen um 0,4–0,9 MJ/kg höheren Wert als Volk et al. an, s. oben.

Hinsichtlich CO₂-Emissionen decken sich die Ergebnisse weitestgehend. Für die mechanische Verwertung von Leichtverpackungen werden Werte zwischen -0,35 kg CO₂ e/kg⁴⁷ (normale Sortierung) und -0,75 kg CO₂ e/kg (optimierte Sortierung) angegeben [26, S. 135 ff.].

Eine Übersicht über Treibhausgasemissionen und Energieaufwand für unterschiedliche Kunststoffabfallströme findet sich bei Knappe et al. [26, S. 135 ff.] und bestätigt die relativ geringen Umweltauswirkungen des mechanischen Recyclings.

Hinsichtlich Ökobilanzierung müssen beim chemischen Recycling umfangreiche Annahmen getroffen werden, da der Aufwand des chemischen Recyclings und für die daraus gewonnenen Produkte von der Zusammensetzung des Einsatzstoffes abhängt und kaum zuverlässige Daten über diesen Aufwand vorliegen. Der Aufwand zur Aufbereitung der Pyrolyseöle (z. B. Hydrotreating) wird dabei häufig unterschlagen, weil man die Öle als Coeinsatzstoff zu Erdöl betrachtet. Nur BASF offenbart für die hochkalorische Fraktion der Flüssigprodukte, dass für die Reinigung mit Natriummethanolat ca. 6 % der THG-Emissionen von 3.348 kg CO₂/t Polyolefine veranschlagt werden.⁴⁸ Ausgehend von der für den Prozess benötigten Gesamtenergie i.H.v. 42,9 GJ/t Input kann allein die Reinigung des Pyrolyseöls 37 % des Energieaufwands beanspruchen⁴⁹ [107, S. 82]. Zusätzlich muss die technische Machbarkeit, die zu belastungsfähigen Daten führt, noch nachgewiesen werden [79, S. 82].

Wechselt man beim chemischen Recycling das Verfahren (z. B. Vergasung), dann müssen für das chemische Recycling deutlich höhere THG-Emissionen und Energieaufwände als bei der Pyrolyse und der Aufbereitung der Öle angesetzt werden. (Siehe Tabelle 16 – aus EBS 9,5 MJ/kg: 5.280 kg CO₂/t bzw. 223 GJ/t Polyolefin [110, S. 119484]. Jedoch ist zu berücksichtigen, dass hier ein deutlich minderwertigerer Abfall aus der Hausmüllentsorgung betrachtet wurde.)

⁴⁷ CO₂ e/kg; Kohlenstoffdioxidäquivalente pro kg Einsatzstoff

⁴⁸ Zum Vergleich: Energieaufwand anteilmäßig verteilt bei EBS/MKS 352 44 MJ/kg: 49 % aus der Pyrolyseölerstellung, 21 % aus dem Steamcracker, 10 % aus der Polymerisation, 13 % aus Abfallsammlung, Sortierung und Transport.

⁴⁹ Die anderen Prozesse benötigen ca. 24 % für die Pyrolyseölerstellung, ca. 17 % Steamcracker und ca. 21 % aus der Polymerisation.

Kritisierbar hinsichtlich des chemischen Recyclings ist, dass in Zukunft gegebenenfalls eine verbesserte Abfallqualität mit höherem Potenzial für mechanisches Recycling bestehen könnte, was die umweltfreundliche Verwertung von Kunststoffabfällen begünstigen würde [58, S. 35]. Eine Bedingung hierfür sind jedoch entsprechende Maßnahmen zur Verbesserung der Kunststoffabfallqualität, die sich u. a. auf europäischer Ebene die *Circular Plastics Alliance* zum Ziel gesetzt hat [111].

Die Rechtfertigung des chemischen Recyclings hängt damit vom Standpunkt ab. Geht man vom *Status quo* aus, dann könnte ein Großteil der Kunststoffabfälle, die derzeit thermisch verwertet werden, in Zukunft über chemische Recyclingverfahren stofflich verwertet werden.

Geht man von einer *qualitativ verbesserten Kunststoffabfallzusammensetzung* aus, so kann deutlich mehr Kunststoffzyklus mechanisch hergestellt und verwendet werden, sodass das chemische Recycling eine weniger ausgeprägte Rolle als nach dem Status quo einnehmen könnte.

Für den Status quo im Hinblick auf KEA und CO₂-Emission beim mechanischen Recycling ist die o. g. LCA von Volk et al. repräsentativ [109]. Wünschenswert wäre jedoch, dass ein deutlich höherer Anteil der Kunststoffabfälle durch geeignete Maßnahmen a) zur Verbesserung der Ausgangsqualität der Kunststoffabfälle und b) zur weiteren Optimierung des mechanischen Recyclings als gut rezyklierbar eingestuft werden könnte. Dies würde auch den ökologischen Fußabdruck des SuV-Prozesses insgesamt erheblich verringern.

Wie in Abschnitt 3.4 beschrieben, werden aufgrund unterschiedlicher Verunreinigungen und Alterungseffekte immer kontaminierte Kunststoffabfälle anfallen, sodass sowohl das mechanische als auch das chemische Recycling einen Anteil an der stofflichen Nutzung von Kunststoffabfällen haben werden. Die Frage bleibt nur, zu welchen Anteilen und inwieweit eine Konkurrenzsituation um die Abfallmengen entstehen könnte.

Die LCA muss auch die *energetische Abfallverwertung* ins Kalkül ziehen. Entsprechend der Verwertungshierarchie steht sie am Ende der Verwertungskette. Zudem ist die Verbrennung keine unmittelbare Prozessstufe in der Kreislaufwirtschaft. Es ist das Verdienst mehrerer Schweizer Studien, die die Ökoeffizienz

sowie die Wirtschaftlichkeit des Kunststoffrecyclings mit der energetischen Verwertung in MVA und Zementwerken verglichen und dabei den Exportüberschuss von Kunststoffprodukten in Schwellenländer ohne etablierte Verwertungssysteme eingerechnet haben [67], [112], [113]. Die Methode erfasst im Unterschied zu den deutschen CO₂-Bilanzen zwar eine Reihe von Umweltfaktoren nicht mit in der Berechnung, wie z. B. Einweg-/Mehrwegsysteme, Landverbrauch, Feinstaub oder terrestrische und aquatische Eutrophierung. Aber die Gegenüberstellung der CO₂-Belastung sowie aller Kosten der energetischen Verwertung inkl. der eingesparten fossilen Energieträger auf der einen Seite und des CO₂-Verbrauchs sowie sämtlicher Kosten aller SuV-Prozessschritte des Recyclings auf der anderen Seite zeigt, dass ein ökologischer Vorteil und ein wirtschaftlicher Benefit des Recyclings aktuell nur beim PET-Recycling gegeben sind. Unter den gegenwärtigen Schweizer Verhältnissen würde ein Recycling weiterer Kunststoffe aus der Gelben-Sack-Sammlung auch bei gleichen Reinheitsgraden nur einen minimalen ökologischen Vorteil bringen, der einer Autofahrt von 30 km pro Jahr und Bürger entspräche. Kostenseitig würden jährlich volkswirtschaftliche Verluste von 500 CHF/t Kunststoffabfall gegenüber der Verbrennung auflaufen [67, S. 2].

Die Schlussfolgerung daraus ist – unabhängig von der Situation des Kunststoffrecyclings in den jeweiligen Ländern – dass

1. eine thermische Verwertung für Sortierreste (sowie für weitere Reststoffe außerhalb des Kunststoffrecyclings) weiterhin notwendig ist,
2. aus Umweltgründen ökologische Vorteile des Recyclings auch bei wirtschaftlichen Nachteilen gegenüber der energetischen Verwertung Priorität haben und die Mehrkosten von den Verursachern und/oder der Gesellschaft zu tragen sind,
3. die Grenze, wo die Verbrennung zum sinnvolleren Verwertungspfad wird, ein höherer CO₂-Verbrauch für das Recycling ist,
4. detaillierte LCA und CO₂-Bilanzen auf der Grundlage einheitlicher Berechnungsmethoden eine höhere Gewichtung bei der Wahl der Verwertungspfade erhalten müssen,
5. über wirksame steuerliche und weitere finanzielle Bonus-Malus-Systeme eine schrittweise Verschiebung des Anteils der energetischen zugunsten der stofflichen Verwertung unterstützt werden muss.

Zwischenfazit:

Grundsätzlich kann man sagen, dass der ökologischste Weg von einer hohen Recyclingquote auf dem höchst möglichen Qualitätsniveau bestimmt wird. Das Hauptaugenmerk muss dabei weiterhin beim mechanischen Recycling liegen, das jedoch durch chemisches Recycling ergänzt werden sollte. Eine Kombination aus beiden Recyclingpfaden, also die werkstoffliche Verwertung geeigneter Abfälle und die chemische Verwertung kontaminierter, schlecht sortierbarer oder überalterter Kunststofffraktionen scheint ökologisch am sinnvollsten zu sein. Dreh- und Angelpunkt der Ökoeffizienz bleibt aber die Qualität bzw. die Werthaltigkeit der Abfälle selbst. Die energetische Verwertung ist erst dann eine Option, wenn der CO_2 -Aufwand für das stoffliche oder das chemische Recycling größer wird als bei der Verbrennung, oder wenn technische Grenzen bei den SuV-Prozessen keine qualitätsgerechten Folgeanwendungen der Kunststoffzyklate bzw. beim chemischen Recycling keinen Einsatz der Produkte als chemische Rohstoffe zulassen.

4.3.3 Wirtschaftliche Bewertung

Allgemeine Wirtschaftliche Bewertung

Die wirtschaftliche Sichtweise der Akteure weicht von der umweltpolitischen und gesamtgesellschaftlichen Sicht ab, weil nicht für alle relevanten Güter ein Preis bestimmt werden kann. Insbesondere ist hier die CO_2 -Belastung neben anderen Umweltbelastungen zu nennen, die mit der Nutzung von Primärmaterialien bzw. mit dem Recycling von Verpackungen zusammenhängen.

Im energetischen Bereich z. B. ist mit den CO_2 -Zertifikaten eine Bewertungsmatrix gefunden, die a) den ökologischen Fußabdruck des jeweiligen Energieträgers abzubilden vermag, und b) als wirtschaftlicher Hebel zum sparsamen Umgang mit fossilen Energieträgern und zu ihrer Substitution durch nachhaltige Energien wirkt.

Solche **wirtschaftlichen Anreize** analog der CO₂-Bepreisung müssten für die Steigerung von Rezyklatquoten in zwei Richtungen Wirkung entfalten:

- **Aufbrechen der Konkurrenz zur thermischen Verwertung:** Mit der vertragsbasierten Annahme der Postconsumer-Abfälle hat die Entsorgungsbranche ihre Einnahmen bereits erzielt. Systembedingt bedeuten die nachfolgenden Sortier- und Aufbereitungsprozesse für eine finale Verwertung letztlich Gewinn-minimierende Kosten. Sind die Kosten für eine thermische Verwertung per sé geringer als das Saldo von Erlösen und Kosten aus einer stofflichen Verwertung, fallen die elementaren wirtschaftlichen Anreize für die Verarbeitung der Abfälle zu Rezyklaten weg. Mit einer zunehmend höheren Auslastung der Müllverbrennungsanlagen (MVA) und EBS-Kraftwerke seit 2015 infolge der Importeinschränkungen für Abfälle in immer mehr Ländern [114] ist zwar eine Trendumkehr bei den Entsorgungskosten in Sicht, für einen Paradigmenwechsel beim Kunststoffrecycling aber auf lange Zeit nicht wirksam. Dies auch deshalb, weil sowohl private als auch kommunale Betreiber der investitionsintensiven MVA ein wirtschaftliches Interesse an langen Laufzeiten über die Amortisationszeiten hinaus und mit zunehmender Laufzeit der MVA auch zunehmend Spielräume in der Preisgestaltung bei der Annahme von Abfällen haben [115]. Hinzu kommt, dass MVA aktuell von den Regelungen des BEHG ausgenommen sind und keine CO₂-Zertifikate erwerben müssen. Dies hat die Ampelkoalition vor, ab 01.01.2023 zu ändern. Der Streit mit den MVA-Betreibern ist allerdings noch offen. Aber selbst dann, wenn die CO₂-Bepreisung für MVA in naher Zukunft greifen sollte, ist es aufgrund der geschilderten Kalkulationsspielräume bei den MVA möglich, dass die thermische Verwertung gegenüber einem Recycling, das dann mit dem Zwang zu einer tieferen Sortierung und höherem Kostenaufwand konfrontiert ist, immer noch Kostenvorteile hat – und damit die angestrebte Verwertungshierarchie unterläuft.
- **Aufbrechen der Konkurrenz zur Neuware in der Kunststoffverarbeitung:** In der Summe aller Kosten, einschließlich umgelegter Umweltkosten, müssen Kunststoffverarbeiter wirtschaftliche Vorteile aus einer höheren Rezyklatquote und geringerem Neuwareinsatz haben. Die Preise für Neuware werden allerdings auf dem Weltmarkt bestimmt und wirken bei niedrigem Niveau oder geringen Preisdifferenzen limitierend für den Rezyklateinsatz.

In beiden Fällen wird ersichtlich, dass eine Verschiebung der thermischen hin zur stofflichen Verwertung nachfrageseitig volatil ist und daher regulatorischer Einflussnahme bedarf.

Bewertung der Akteure aus der Wirtschaft

An der Befragung (3.12.21 bis 17.1.22) haben 17 Akteure aus der Abfallerfassung und Sortierung, Herstellung von Rezyklaten und Handel mit Rezyklaten teilgenommen. 59 potenzielle Anwender haben ihre Sicht der Dinge durch Beantwortung der Fragen dargestellt.

*Die Befragung hat als wichtigste Hindernisse für den **Rezyklateinsatz aus der Sicht der Recyclingbranche** weiterhin ergeben⁵⁰:*

- ▷ *Die verwendete Sortiertechnik wird auf einem veralteten Stand gesehen. Als Gründe für den Investitionsstau werden genannt:*
 - ▷ *Überbordende Bürokratie*
 - ▷ *Geringe Nachfrage nach Rezyklaten⁵¹*
 - ▷ *Unklare Rahmenbedingungen, die durch die Politik vorgegeben werden. Dies führt zu Planungsunsicherheit.*
 - ▷ *Zu geringe Preise für Rezyklate (geringere Zustimmung).*
- ▷ *Als den Absatz erschwerende Faktoren werden hauptsächlich gesehen:*
 - ▷ *Qualitätsanforderungen der Abnehmer*
 - ▷ *Mangelnde Förderung von Investitionen in Recyclinganlagen*
 - ▷ *Rohstoffpreise*
 - ▷ *Vertragslaufzeiten mit den Lieferanten und Abnehmern.⁵²*
- ▷ *Als wichtigste wirtschaftliche Anreizmaßnahmen werden gesehen⁵³*
 - ▷ *Sonderabschreibungsmöglichkeiten für Investitionen in moderne Sortier- und Verarbeitungstechnik. (Dies korreliert mit der bemängelten Kurz- bzw. Mittelfristigkeit der Lieferverträge.)*

50 Befragung: Fragen 14 und 15

51 Gleichzeitig attestiert die überwiegende Mehrheit der Befragungsteilnehmer bei den Fragen 4, 43 und 45, dass die Nachfrage primär von der Rezyklatqualität abhängt und bei hochwertigen Rezyklaten auch eine hohe Nachfrage vorhanden ist.

52 Erläuterung: Hier gibt es eine Diskrepanz der gewünschten Vertragslaufzeiten von Abnehmern der Rezyklate auf der einen Seite, die eher an längerfristigen Lieferantenbeziehungen interessiert sind, um erforderliche Qualitäten und Liefersicherheit zu gewährleisten. Die Rezyklat-Lieferanten (SuV-Unternehmen) auf der anderen Seite gewinnen Ausschreibungen zur Entsorgung und Verwertung über Mengen und Preis und haben für die Zeit nach Auslaufen des Leistungsvertrages keine Sicherheit für langfristige Verträge zur Lieferung von Rezyklaten. Deren Verträge und Planungen sind also maximal mittelfristig. Diese Kurzfristigkeit der Lieferverträge erschwert so auch längerfristige Investitionen. Gründe sind u. a. die Oligopolstellung der dualen Systeme und die Ausschreibungspflicht für Entsorgungs- und Verwertungsleistungen ...

53 Befragung: Fragen 23 bis 32

- ▷ *Förderung von Investitionen in und Beteiligungen an Unternehmen, die Rezyklate produzieren. (Durch eine solche Maßnahme kann die Eigenkapitalquote gestärkt und die Abhängigkeit von Fremdkapital verringert werden.) Dies führt zu einer größeren Flexibilität von Unternehmen, da die Eigenkapitalvergütung typischerweise mit der Gewinnsituation des Unternehmens einhergeht.*
- ▷ *Vorgeschriebene Mindestquoten für Rezyklateinsatz*
- ▷ *Vorgaben bzw. Vorteile bei öffentlicher Auftragsvergabe zur Verwendung von Rezyklaten*
- ▷ *Vorgaben für kreislauforientiertes Produktdesign (starke Zustimmung)*
- ▷ *Cradle-to-Cradle-Zertifikat für Recyclingprodukte*
- ▷ *Wenig Zustimmung erhielt die Verringerung der Anforderungen an Rezyklate.*
- ▷ *Weiterhin genannt wurde: CO₂-Anrechnung sowie ein Verbot von Verbundverpackungen.*

*Wichtigste Hindernisse für den **Rezyklateinsatz aus der Sicht der (potenziellen) Anwender von Rezyklaten**⁵⁴*

- ▷ *Absatzrelevante Hindernisse:*
 - ▷ *Erzielbare Preise der eigenen Produkte*
 - ▷ *Qualitätsanforderungen der Abnehmer, die Qualitätseinbußen/-Schwankungen beim Rezyklateinsatz nicht tolerieren (können).*
 - ▷ *Vertragsumfang und Liefermengen – Die zur Verfügung stehenden Liefermengen an Rezyklaten sind häufig zu gering und nicht mit den benötigten Liefermengen übereinzubringen.*
 - ▷ *Lebensmittelrechtliche Anforderungen verhindern in vielen Fällen den Einsatz von Rezyklaten.*
 - ▷ *Weiterhin wurden genannt:*
 - *Marktmacht des Lebensmitteleinzelhandels*
 - *Akzeptanz der Kunden, sie müssen erst überzeugt werden, auch Rezyklate zu akzeptieren, besonders an Stellen, an denen Primärware nicht notwendig wäre.*
- ▷ *Als wirtschaftliche Anreizmaßnahmen werden gesehen⁵⁵:*

⁵⁴ Befragung: Fragen 14 und 15

⁵⁵ Befragung: Fragen 55–64. Der Antwortquotient lag bei den Fragen 55 – 63 zwischen 2,47 und 3,73 (von 5).

- *Rechtlich anerkannte Zertifizierung für Post-Industrial und Post-Consumer Rezyklate*⁵⁹
- *Mindestquote für Rezyklateinsatz bei Lebensmittelverpackungen ist nur möglich, wenn lebensmittelsicheres Rezyklat in ausreichender Menge und Qualität am Markt verfügbar ist.*

4.4 Allgemeine Hemmnisse für die Wiederverwertung von Kunststoffen

In Umwelt- und in Branchenverbänden sowie in der Politik gibt es mittlerweile ein weitestgehend kongruentes Problembewusstsein darüber, dass der Status quo des Kunststoffrecyclings den Anforderungen der Zukunft hinsichtlich Rohstoffeffizienz und CO₂-Neutralität nicht genügt. Hinsichtlich der Hemmnisse zur Wiederverwertung von Kunststoffabfällen sind in verschiedenen Publikationen und Studien allerdings sehr viele verschiedene, zum Teil auch sich widersprechende Argumente bekannt.

Gegenstand der Debatte um die **Hemmnisse im Kunststoffrecycling** im Allgemeinen und für die Erhöhung der Rezyklatquote in der Kunststoffverarbeitung im Besonderen sind im Wesentlichen die folgenden Punkte [19]:

1. Kunststoffprodukte, insbesondere PCL-Verpackungen, sind – wie in den vorhergehenden Abschnitten ausführlich dargestellt – materialseitig hochfunktional und oftmals sehr komplex, aber genau dadurch schwer oder oftmals gar nicht werkstofflich zu recyceln. Hier geht die Diskussion darum, wie die **Recyclingfähigkeit durch Design for Recycling** bzw. Design for Circularity erhöht werden kann.
2. Die **Erfassungs- und Sammelsysteme** sind – auch aufgrund des scharfen Wettbewerbs zwischen den dualen Systemen – primär auf die Wirtschaftlichkeit der Logistik ausgerichtet und in der Regel von den anderen vor- und nachgelagerten Prozessen des Wertstoffkreis-

⁵⁹ Was die Befragungsteilnehmer damit genau meinen, ist unklar. In der Tat gibt es diverse Gütesiegel wie den Blauen Engel und Produktlabel, aber keine europaweit verbindlichen PCR- und PIR-Zertifikate. Sehr gute Ansätze bieten hierfür z. B. die DIN SPEC 91446 für ein erweitertes, aussagekräftiges Produktlabel und als mögliche Basis für einen digitalen Produktpass, sowie die DIN EN 15343:2008-02 zur Überwachung der Ausgangsstoffe und der Rückverfolgbarkeit der Verarbeitungskette.

laufes abgekoppelt. Auch die Qualitätsaspekte der unterschiedlichen Sammelsysteme werden dabei kaum berücksichtigt. Auswege werden auf zwei Ebenen diskutiert, zum einen strukturell, also die Einbindung der Kunststoffabfallerfassung in integrierte Systeme mit einer linearen Wertschöpfungskette, wie es z. B. bei der Schwarz-Gruppe mit dem übernommenen überregionalen SuV-Unternehmen PreZero schon begonnen wurde umzusetzen [117, S. 21 ff.]. Zum anderen **technisch-organisatorisch** nach Hol- und Bringsystemen oder wenn ein produkt- und materialspezifisch weiter ausdifferenziertes Sammelsystem (z. B. mehrere verschiedene „Gelbe Tonnen“) gefordert wird – bei einer zeitgleichen Priorisierung von produkt- und materialspezifischen Pfand- und Rücknahmesystemen für höhere Reinheitsgrade der Ausgangsstoffe des Recyclings. Dies sind überschneidende Aufgaben der Abfallwirtschaft, der Verpackungsindustrie und des Handels.

3. Die technische Limitierung der **Sortiertechnik** und der Investitionsstau in der Abfallwirtschaft sind primär wirtschaftlich bedingt. Der Stand der Technik in der Abfallwirtschaft ist vom technisch Machbaren oft weit entfernt (siehe [26] und Abschnitte 4.2.3 und 3.4.3). Neben den unter 1. und 2. genannten Hemmnissen sind es primär die Nachfragedefizite sowie die begrenzte Konkurrenzfähigkeit der Marktpreise für Rezyklate gegenüber Neuware-Preisen, wodurch eine Refinanzierung von Investitionen in moderne Sortier- und Verarbeitungstechnik oft nicht möglich ist. Durch eine erhöhte Investitionsneigung könnte die Modernisierung, auch mit den zunehmenden Möglichkeiten der KI, schneller vorankommen.
4. Zu einem sich weitestgehend selbsttragenden Wertstoffkreislauf gehört die Implementierung des **chemischen Recyclings** als notwendige Zwischenstufe zwischen werkstofflichem Recycling und thermischer Verwertung der Sortierreste. Die wenigen, oft mit hohen Verlusten verbundenen Pilotprojekte einzelner Entsorgungsunternehmen zur Depolymerisation von Kunststoffabfällen zur Rückgewinnung chemisch reiner Rohstoffe scheiterten in der Vergangenheit zum einen oftmals an fehlender technologischer Kompetenz. Diese ist zwar in der chemischen Industrie (Erdölverarbeitung, Kunststoffhersteller) per se vorhanden, aber im Kunststoffrecycling,

also bei der Verwertung der eigenen Produkte, ist die Chemiebranche faktisch bislang nicht präsent. Zum anderen waren es Kostengründe und schlechte Ökobilanzen, die z. B. 2017 die Abfallpyrolyse in Burgau zur Schließung brachten [101], vor allem aber in Japan und Südkorea ab den 2000er Jahren zu einer schrittweisen Ablösung der ansonsten technisch gut funktionierenden Vergasungs- und z. T. auch Verölungsanlagen durch Müllverbrennungsanlagen und Kokereien (Einsatz von Kunststoffen als Reduktionsmittel) geführt hatten (siehe auch [115, S. 111] sowie [118]). Zudem wurden in keiner dieser Anlagen Rohstoffe für die Synthese-Chemie im Sinne der Kreislaufwirtschaft hergestellt. Die chemische Industrie hatte ihrerseits auch objektiv keinen Bedarf an teuren und qualitativ limitierten Rohstoffen, wie sie mit dem chemischen Recycling bei den aktuellen, durchschnittlichen Abfallqualitäten herzustellen sind. Denn die chemische Industrie konnte immer – abgesehen von temporären Marktausschlägen – auf gute und preiswerte fossile Rohstoffe in auskömmlichen Mengen zurückgreifen.

5. Die **rechtlichen Rahmenbedingungen** für alle Teilprozesse des Kunststoffrecyclings und insbesondere für eine Erhöhung der Rezyklatquote zielen vom umweltpolitischen Ansatz her bereits durchgängig auf eine Förderung der Kreislaufwirtschaft. Von Branchenakteuren, Umweltverbänden, Ingenieursgesellschaften und aus der Wissenschaft kommen jedoch Forderungen, die Regelungen konsequenter zugunsten der Verwendung von Rezyklaten in der Kunststoffverarbeitung zu gestalten, so dass die strukturellen Marktnachteile kompensiert werden können [19], [21], [51]. Dabei würde der Marktnachteil von Sekundärrohstoffen hauptsächlich daraus resultieren, dass der wesentlich höhere CO₂-Footprint bei der Herstellung von Neuware aus fossilen Rohstoffen nicht ausreichend im Marktpreis abgebildet sei und hier der Staat regulierend eingreifen müsse (z. B. [2]).
6. Aus Sicht der Verarbeiter von Rezyklaten sowie der Inverkehrbringer, also des Handels, behindert die **Intransparenz der Liefer- und der Wertschöpfungsketten** von der Abfallsammlung bis zur Rezyklatverwendung eine offensive Verbraucheransprache und Werbung für

kreislaufgerechte Verpackungen. Die Gewinnung der Verbraucher für eine kontinuierliche Nachfrage nach rezyklatbasierten Produkten bzw. Verpackungen ist eine übergreifende Aufgabe. Produktzertifizierungen mit Gütesiegeln wie „Blauer Engel“ und RAL-Gütezeichen sind in der öffentlichen Beschaffung und noch mehr beim Verbraucher bislang kaum Grundlagen für Kaufentscheidungen.

7. **Kostennachteile** sind aus wirtschaftlicher Hinsicht das größte Hemmnis für die Aufarbeitung und stoffliche Verwertung von Kunststoffabfällen, s. dazu auch Abschnitt 3.2. Die Hersteller von Rezyklaten sehen sich unter den gegebenen marktwirtschaftlichen Bedingungen einer doppelten Konkurrenz ausgesetzt, a) der Konkurrenz zur Neuware, die i. d. R. eine höhere Qualität hat, größere Produktsicherheit mitbringt, aber als globale Massenware selbst unter Preisdruck steht. Der Preis für virgin material ist daher für Rezyklate kostenseitig die Benchmark nach oben. b) Die Konkurrenz zur thermischen Verwertung bestimmt die Grenzkosten nach unten. Solange die Gestehungskosten für Ersatzbrennstoff aus Kunststoffabfällen unter denen für die Herstellung von Rezyklaten liegen bzw. die Margen aus dem Verkauf von Rezyklaten kleiner als die für Ersatzbrennstoff sind, werden die Abfallströme maßgeblich in den profitableren Entsorgungsweg, also in die thermische Verwertung gelenkt.

Ausgewählte dieser allgemeinen Hemmnisse werden im Folgenden noch etwas tiefergehender beleuchtet.

4.4.1 Hemmnis Recyclingfähigkeit

Recyclingfähigkeit ist keine theoretische Eigenschaft. Richtig verstanden wird damit die stoffliche Eignung eines Produktes beschrieben, im Rahmen der etablierten und der aktuell technisch möglichen Erfassungs- und Verwertungsstrukturen zur Schließung von Stoffkreisläufen beizutragen [119, S. 4]. Diese stoffliche Eignung – auf Grundlage der in den Abschnitten 3.1.1 und 3.1.2 ausführlich beschriebenen kunststofftechnischen Probleme – kann nach den folgenden **vier Kriterien** bewertet werden, die zugleich auch die Hemmnisse bei der Verwendung der Rezyklate zusammenfassen:

Funktion

Gemäß den veränderten physikalischen und mechanischen Eigenschaften von Kunststoffrezyklaten weisen rezyklierte Materialien im Vergleich zu Neuware wie beschrieben in der Regel schlechtere technische Eigenschaften auf, weil trotz guter Recyclingtechnologien Kontaminationen (Etiketten, Pigmente, Additive, Klebstoffe, Papier [26, S. 18]) in das Rezyklat gelangen. Die Folge ist ein Qualitätsverlust der Kunststoffteile, der mit jedem neuen Kreislauf zunimmt. Besonders wirkt sich dies auf die mechanische Widerstandsfähigkeit von Recyclingmaterialien aus und ist für die Herstellung von Kunststoffverpackungen ein großes Hindernis (z. B. Reißen, Versprödung, Oberflächenfehler). Zur Minderung der negativen Effekte wird sehr häufig Neumaterial mit Rezyklat gemischt [28, S. 12].

Kontaminationen

können den Einsatz im Lebensmittelbereich komplett verhindern. Auch der Einsatz alter Werkstoffe mit unzulässigen Additiven kommen für heutige Anwendungen oft nicht in Frage (z. B. Flammenschutzmittel) und müssen thermisch (oder chemisch) verwertet werden [26, S. 91].

Auch im Bausektor gilt, dass Baustoffe aus Plastik eine Reihe von Schadstoffen beinhalten, die heute nicht mehr verwendet werden dürfen und ein erhebliches Hemmnis für das Recycling darstellen. Dies gilt insbesondere für Stabilisatoren, Flammenschutzmittel und Weichmacher. Diese Schadstoffe können in der Regel nicht oder nur mit hohem (d. h. unwirtschaftlichem) Aufwand entfernt werden.

Zusätzlich haben sich die Zulassungsregularien für viele Stoffe in den letzten Jahren geändert. Es ist daher davon auszugehen, dass in Zukunft auch weitere Stoffe reguliert werden und dem Recycling im Wege stehen können.

Bei Glasfasern, die zur Materialverstärkung eingesetzt werden, gibt es bisher keine kritische Einstufung. Für den Fall, dass verstärkt GFK recycelt werden, ist jedoch nicht auszuschließen, dass auch hier Einschränkungen vorgenommen werden [120, S. 27].

Anmutung

(besonders Geruch) und Gestaltbarkeit (z. B. Farbe und Homogenität) als sekundäre Verpackungsmerkmale stellen dabei die größten Hemmnisse für einen verstärkten Rezyklateinsatz in Kunststoffverpackungen dar [14].

Geruchsauffälligkeiten sind vor allem für den Verpackungs- und den Automobilbereich sowie für Rauminnenanwendungen ein Problem. Dem Geruch kann nur durch entsprechenden Mehraufwand (Waschen, Strippen, Schmelzentgasung) entgegengewirkt werden, ist oft aber nicht vollständig zu vermeiden. Bei der Farbgebung gilt ähnliches [26, S. 18], siehe dazu auch Abschnitt 3.2.3.

Homogenität

bzw. zu hohe Heterogenität und die damit zusammenhängende geringere Lieferverlässlichkeit gehören zu den relevanten werkstofflichen Hemmnissen für einen höheren Rezyklateinsatz. Die Qualität der Rezyklate kann dabei mit der Abfallzusammensetzung stark saisonal und regional schwanken, zumal keine Qualitätsstandards für Rezyklate gesetzt sind [14, S. 25 f.].

Daraus resultierend stehen vor allem im Lebensmittelbereich zu wenige qualitativ geeignete Rezyklate zur Verfügung. Doch auch im Nichtlebensmittelbereich kommt es zu erheblichen Problemen hinsichtlich Quantität/Qualität/Homogenität der Rezyklate und der Verlässlichkeit.

Bei weniger anspruchsvollen Produkten aus Rezyklaten oder Produkten mit hohen Rezyklatanteilen bestehen diese Hemmnisse in geringerem Maße. Dabei sind bestimmte Polymerarten mehr, andere weniger für einen Rezyklateinsatz in lebensmittelgerechten Verpackungen geeignet:

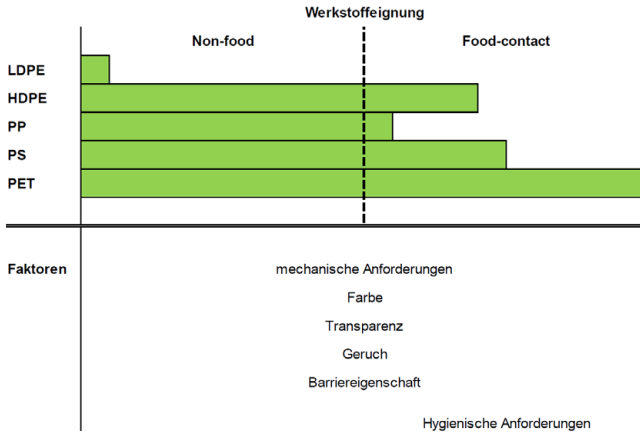


Abb. 20: Anwendungseignung verschiedener Polymer-Rezyklate [121, S. 4]⁶⁰

Wie die Abb. 20 zeigt, hat rPET hier die besten Eigenschaften und, insbesondere im Foodbereich, schon allein von den Stoffeigenschaften das größte Potenzial. Wichtigste Anforderungen sind hier mechanische Kennwerte, Farbe, Transparenz, Geruch und Barriereeigenschaften, aber auch hygienische Anforderungen, was wiederum den Bereich „Fremdstoffe“ anspricht. Dies bedeutet aber auch, dass alle anderen Massenkunststoffe als Rezyklate nur teilweise im Foodbereich nutzbar sind.

Zielkonflikte im Design for Recycling

Als eine Lösung und eine der stärksten Maßnahmen zur Steigerung der Recyclingfähigkeit wird das „Design for Recycling“ (D4R) oder „Design for Circularity“ angesehen. Die Forderung gehört zwar mittlerweile zu den Basics bei der Gestaltung von Kunststoffprodukten, steht aber oft im Zielkonflikt mit den verschiedenen Funktionen, in Sonderheit bei Kunststoffverpackungen, und ist dadurch mitunter schwer umzusetzen. Dies vielfach auch aufgrund der Unkenntnis über die produktseitigen Anforderungen an die Recyclingfähigkeit sowie über Design-Alternativen. Am Beispiel von Kunststoffverpackungen lassen sich die **Zielkonflikte** bei der Gestaltung von Kunststoffprodukten am

⁶⁰ Die Länge der Balken stellt dar, wie nah die verschiedenen Kunststoffe im Eigenschaftenbündel (Faktoren) am Food-Grade sind, der hier als Grenze (gestrichelte Linie) dargestellt ist.

besten deutlich machen. Die Funktion einer Verpackung kann in Primär-, Sekundär- und Tertiärfunktionen unterteilt werden [122]:

- **Primärfunktionen:** Schutzfunktion, Lagerfunktion, Lade- und Transportfunktion
- **Sekundärfunktionen:** Verkaufsfunktion, Werbefunktion, Dienstleistungsfunktion, Garantiefunktion
- **Tertiärfunktionen (Zusatzfunktion):** andere Nutzung, Recyclierbarkeit, ...

Will man also die Verpackung zweckdienlich gestalten, so müssen die Primärfunktionen immer erfüllt sein. Die Frage ist nur, in welchem Umfang.

Beispiel Primärfunktion – Schutzfunktion

Als exemplarisches Beispiel kann hier das Mindesthaltbarkeitsdatum bei Lebensmitteln dienen. Die Schutzfunktion gegenüber dem Verderben muss gewährleistet sein. Geeignete Verpackungen tragen damit in erheblichem Maß zur Ressourceneffizienz und zum Umweltschutz bei. Doch die Frage ist, für welche Zeitdauer? Muss das volle materialtechnische Potenzial auf Kosten der Rezyklierbarkeit ausgeschöpft werden? Von diesen Anforderungen hängt dann die Materialwahl ab und es läuft auf immer komplexere Materialien hinaus, je länger die Ware haltbar sein soll.

Zur Erreichung möglicher Umweltziele können unterschiedliche Wege eingeschlagen werden. Dicke Monomaterialien oder dünne und ressourcensparende Multilayers mit Barrierschichten zum Schutz gegenüber Sauerstoff, Keimen und Wasser? Während erstere vielleicht sehr gut zu recyceln sind, nimmt bei letzterem die stoffliche Wiederverwertbarkeit des Verpackungsmaterials ab, weil die unterschiedlichen Schichten nicht einfach voneinander getrennt und verarbeitet werden können. Die primäre Schutzfunktion kann also unterschiedlich erreicht werden. Die Forderung von D4R zur Verwendung von Monomaterialien auf der einen Seite (Kompatibilität mit vorhandenen Recyclingstrukturen) und die leichte, ressourcenschonende Verpackung (Materialeinsparung durch Multilayer mit Barrierschichten) auf der anderen Seite führen zum Zielkonflikt – minimaler Materialeinsatz vs. Recyclingfähigkeit.

Ähnliches gilt auch für den reduzierten Ressourceneinsatz bei gleichzeitig besseren Eigenschaften vs. Füllstoffanteil im Rezyklat (Abb. 21) [76]. Compoun-

dieren von Plastikbechern z. B. mit mehr Kreideanteilen verbraucht weniger fossile Ressourcen und kann mechanische Eigenschaften verbessern. Die Menge an Additiven kann jedoch den Recyclingprozess erschweren und am Ende die Eigenschaften des Rezyklats negativ beeinflussen.

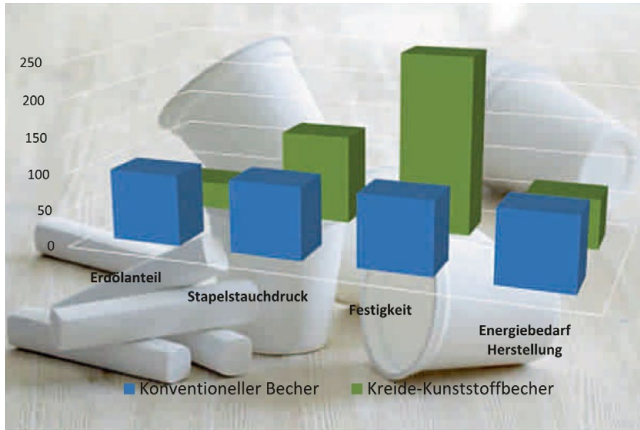


Abb. 21: Exemplarischer Zielkonflikt zwischen Rezyklierbarkeit [76, S. 218]

Wie oben dargestellt sind Farbe und Geruch der Rezyklate ein Hemmnis. Innovative technische Lösungsansätze scheitern oft an den Investitionskosten und der Notwendigkeit, diese hinsichtlich des Verbrauchs an Energie, Wasser und Betriebsmitteln effizienter und damit ebenfalls wirtschaftlicher zu machen [26].

Verallgemeinert gibt es beim ökologischen Design immer Zielkonflikte, die in den Firmen entsprechend der jeweiligen Firmenphilosophie und unter der Berücksichtigung der Sekundär- und Tertiärfunktionen immer individuell austariert werden müssen. In Abb. 22 sind zwei hypothetische Möglichkeiten skizziert, indem der minimierte Materialeinsatz im Zielkonflikt zu Wiederverwendbarkeit steht.

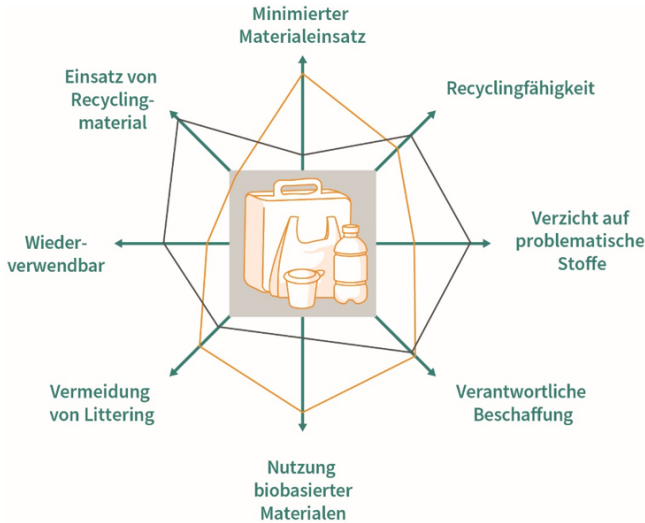


Abb. 22: Zielkonflikt bei der Gestaltung ökologischer Verpackungen [123, S. 203]

Beispiel Sekundärfunktion – Verkaufsfunktion/Wiedererkennbarkeit

Auch Sekundärfunktionen wie der Wiedererkennungswert stehen Nachhaltigkeitsaspekten häufig gegenüber. Produkte werden an ihrem Design erkannt. Dazu gehören Form, Farbe, Haptik und Layout, sodass bestimmte Produkte entsprechend assoziiert werden. Dies kann mehr oder weniger zur Recyclingfreundlichkeit beitragen. So kann eine dunkle Farbwahl nur dunkle, häufig minderwertige Rezyklate zur Folge haben, während transparente oder weiße Kunststoffe höherwertige Rezyklate ermöglichen.

Der Status quo ist, dass bis dato Verpackungen prioritär hinsichtlich ihrer sekundären Funktionalitäten designt wurden und nur ausnahmsweise unter Nachhaltigkeitskriterien.

Ziel muss es werden, dass D4R zu einem elementaren Bestandteil oder gar DIE ganz individuelle Marken- bzw. Unternehmens-DNA wird, die eine einzigartige, transparente Nachhaltigkeitsstrategie des Unternehmens kommuniziert und damit den Erfolg am Markt fördert. Verstoßen Marke oder Unternehmen gegen ihre DNA, machen sie sich unglaublich und angreifbar. Generell geht es nicht darum, möglichst plakativ ökologisch in Einzelaspekten aufzutreten.

Wesentlich ist es, dass das gesamte Erscheinungsbild (ökonomisch, ökologisch und sozial) wahrgenommen wird. (siehe auch [76, S. 198]).

Aufgrund der exemplarisch genannten Zielkonflikte – Welche ökologische Ausrichtung ist zu wählen? – laufen viele Empfehlungen zur Verbesserung einer ökologischen Recyclingfähigkeit oftmals in eine gegenläufige Richtung (z. B. Kreideadditive und weniger Erdöleinsatz vs. Rezyklierbarkeit) oder werden nur ungenügend berücksichtigt. Mindestens eine der Forderungen (siehe Abschnitt 4.1) – Verwendung von Monomaterialien, keine/helle Farben, leicht entleerbare Behälter, leicht abtrennbare Komponenten, wenig Etikette/Etiketten aus demselben Material, kaum Druckfarben – widerspricht häufig den Sekundärmerkmalen bzw. der angestrebten Unternehmens-DNA.

Daher muss das D4R nicht nur firmenintern, sondern systemisch über *alle Beteiligten des Kunststoffkreislaufs* gedacht und umgesetzt werden. Den Rahmen dafür können und sollten verbindliche Prinzipien und normative Vorgaben für das D4R bilden, welche die beschriebenen Zielkonflikte auszutarieren versuchen. Diese Normen müssen von den Branchenakteuren selbst entwickelt werden, jedoch zwingend unter Einbeziehung der Politik und der Verbraucherseite. „Der Ausbau sinnvoller Rezyklatapplikationen in Verpackungen setzt D4R und höhere Standardisierungen voraus; nicht nur um Rezyklatqualitäten zu verbessern, sondern auch um Skaleneffekte zu generieren, die eine aufwendigere Aufbereitung und Veredelung erst wirtschaftlich darstellbar machen.“ [121, S. 11].

Exkurs 3

Relevanz der Verpackungen

Ein unter Verbrauchern viel diskutiertes Objekt ist die Verpackungsfolie einer Bio-Gurke. Hier geht es um das vielschichtige Thema der Sinnhaftigkeit von Verpackungen. Auf den ersten Blick erscheint die zusätzliche Umhüllung einer bereits von der Natur verpackten Frucht (in Form der grünen Gurkenschale) völlig überzogen und ein Paradebeispiel für Verschwendung zu sein. Auf den zweiten Blick jedoch, wenn man Verkaufszahlen und Verkaufsspannen der teureren Biogurken anschaut, macht eine solche zusätzliche Verpackung Sinn.

Durch den Frischhalteeffekt der Folie verlängert sich die Verkaufsspanne einer Bio-Gurke und Verluste im Handel fallen um die Hälfte geringer aus [124], was in der Ökobilanz mehr ins Gewicht fällt als die Folie selbst. Generell ist häufig die ökologische Bilanz des verpackten Gutes

weitaus höher als die der Verpackung selbst [1]. Wie in Abb. 23 dargestellt, führt eine Ökobilanzierung zu der Aussage, dass 1 Liter Milch mit 95 Umweltbelastungspunkten (UBP) zu Buche schlagen. Die Verpackung in Form einer PE-Flasche jedoch nur mit 5.

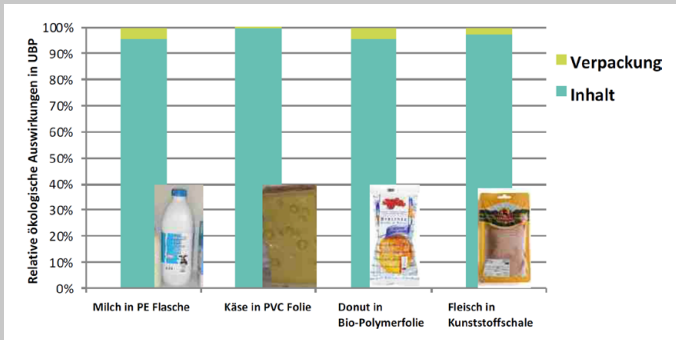


Abb. 23: Relevanz von Verpackungen [1, S. 8]

D4R und Normungsprozesse – Stand, Probleme und Aussichten

Erst seit wenigen Jahren gibt es dezidiert politisch-regulatorische Aktivitäten, um relevante Normungsprozesse für Produktdesign in Industrie und Handel auf eine Kreislauffähigkeit zu justieren. Auf Basis der DIN ISO 14001, die allgemeine Leitlinien für Umweltmanagement-Systeme formuliert, wurde Ende 2020 die ISO 14009 „Umweltmanagementsysteme – Leitlinien zur Einbeziehung der Kreislaufführung von Materialien bei Design und Entwicklung“ veröffentlicht. Grundlage dafür ist die europäische Norm IEC 62430 „Environmentally conscious design (ECD) – Principles, requirements and guidance“ von 2019. Da es sich bei allen drei Normen nicht um Produktnormen, sondern um „Leitlinien“ faktisch ohne Kontroll- und Sanktionsmöglichkeiten handelt, beschränkt sich die Lenkungswirkung zunächst nur auf die Justierung der nachfolgenden Entwicklung von abgeleiteten DIN-Normen und Design-Standards mit einem ggf. höheren Verbindlichkeitsgrad. Seit 2020 wird an mehreren Normungsprojekten gearbeitet, wie dem Projekt ISO/WD 59004 „Circular Economy – Rahmenbedingungen und Grundsätze für die Umsetzung“ inkl. einem Leitfaden zur Umsetzung dieser Grundsätze in Kreislaufwirtschaft, oder die ISO/WD 59020 „Circular Economy – Rahmenbedingungen zur Messung der Zirkularität“.

Aber auch hier handelt es sich (noch) nicht um sanktionsbewerte Produkt- oder Prozessnormen. Dies ist auch nachvollziehbar, da es bereits sehr viele Produkt-Normen gibt, die prioritär der Herstellungs- sowie der Produktsicherheit dienen und Recyclerfordernisse dem nicht entgegenstehen können. Das heißt aber auch, die Forderung nach einem Design for Recycling ist und bleibt zunächst eine Handlungsempfehlung, die auf ein Problembewusstsein bei den Entwicklungsteams der Hersteller abstellt und deren Kreativität in Bezug auf eine bislang zu wenig berücksichtigte Produktfunktion wie Kreislauffähigkeit herausfordert. Das trifft auch auf den Handel als Inverkehrbringer zu, der in seinen Produktspezifikationen sämtliche ökologischen Aspekte viel dezidierter einfordern muss.

Vor diesem Hintergrund verwundert es nicht, dass auch die **Design-Vorgaben** für Verpackungen erst einmal nur empfehlenden Charakter haben. So heißt es im § 4 des Verpackungsgesetzes (VerPackG) von 2021 unter anderem, die Verpackungen sind so zu entwickeln, herzustellen und zu vertreiben, „dass

1. Verpackungsvolumen und -masse auf das Mindestmaß begrenzt werden, das zur Gewährleistung der erforderlichen Sicherheit und Hygiene der zu verpackenden Ware und zu deren Akzeptanz durch den Verbraucher angemessen ist;
2. ihre Wiederverwendung oder Verwertung, einschließlich des Recyclings, im Einklang mit der Abfallhierarchie möglich ist und die Umweltauswirkungen bei der Wiederverwendung, der Vorbereitung zur Wiederverwendung, dem Recycling, der sonstigen Verwertung oder der Beseitigung der Verpackungsabfälle auf ein Mindestmaß beschränkt bleiben;
3. bei der Beseitigung von Verpackungen oder Verpackungsbestandteilen auftretende schädliche und gefährliche Stoffe und Materialien in Emissionen, Asche oder Sickerwasser auf ein Mindestmaß beschränkt bleiben;
4. die Wiederverwendbarkeit von Verpackungen und der Anteil von sekundären Rohstoffen an der Verpackungsmasse auf ein möglichst hohes Maß gesteigert wird, welches unter Berücksichtigung der Gewährleistung der erforderlichen Sicherheit und Hygiene der zu verpackenden Ware und unter Berücksichtigung der Akzeptanz für den Verbraucher technisch möglich und wirtschaftlich zumutbar ist.“

Durchgängige Aufgabe für alle Beteiligten am D4R ist es, auch den finalen **Verbraucher** an dem Punkt abzuholen, wo er in Bezug auf seine Verantwortung für die Kreislaufwende steht. Entsorgungsunternehmen verweisen auf das Dilemma, dass es für die Bürger immer öfter schwierig ist zu entscheiden, welcher Haushaltsabfall in welche Tonne gehört. Ist die Verpackung bspw. braun und fühlt sich wie Pappe an, landet sie in der Papiertonne, auch wenn sie eigentlich in die Gelbe Tonne gehört. Andererseits landen Kunststoffabfälle in der Gelben Tonne, die gar keine Verpackungen waren. Hier hat das D4R deutlichen Verbesserungsbedarf [55].

Ob die im VerPackG austarierten Formulierungen der zuvor dargestellten Zielkonflikte bei den Branchenakteuren das Problembewusstsein in der Breite schärfen und beim D4R Fortschritte bewirken können, wird sich in den kommenden Jahren zeigen. Immerhin gibt es mittlerweile von großen und mittelständischen Unternehmen entlang der Wertschöpfungskette von Kunststoffverpackungen Initiativen wie die Gründung der Plattform *RecyClass*, die harmonisierte Richtlinien für das Design for Recycling, Bewertungsmethoden und Testprotokolle zur Bewertung der Recyclingfähigkeit von Kunststoffverpackungen und neuer Verpackungstechnologien für den europäischen Markt entwickeln und umsetzen will. Ziel ist die Errichtung eines entsprechenden **europäischen Zertifizierungssystems für das D4R**. Aktuell ist bei *RecyClass* bereits eine Freeware für Markeninhaber, Kunststoffverarbeiter, Verpackungshersteller, Produktdesigner und den Handel verfügbar, mit der die Recyclingfähigkeit von Produkten in einer Selbstevaluierung bewertet werden kann [125].

Wie ein solches **Tool** aufgebaut ist, zeigen die drei folgenden Abbildungen:

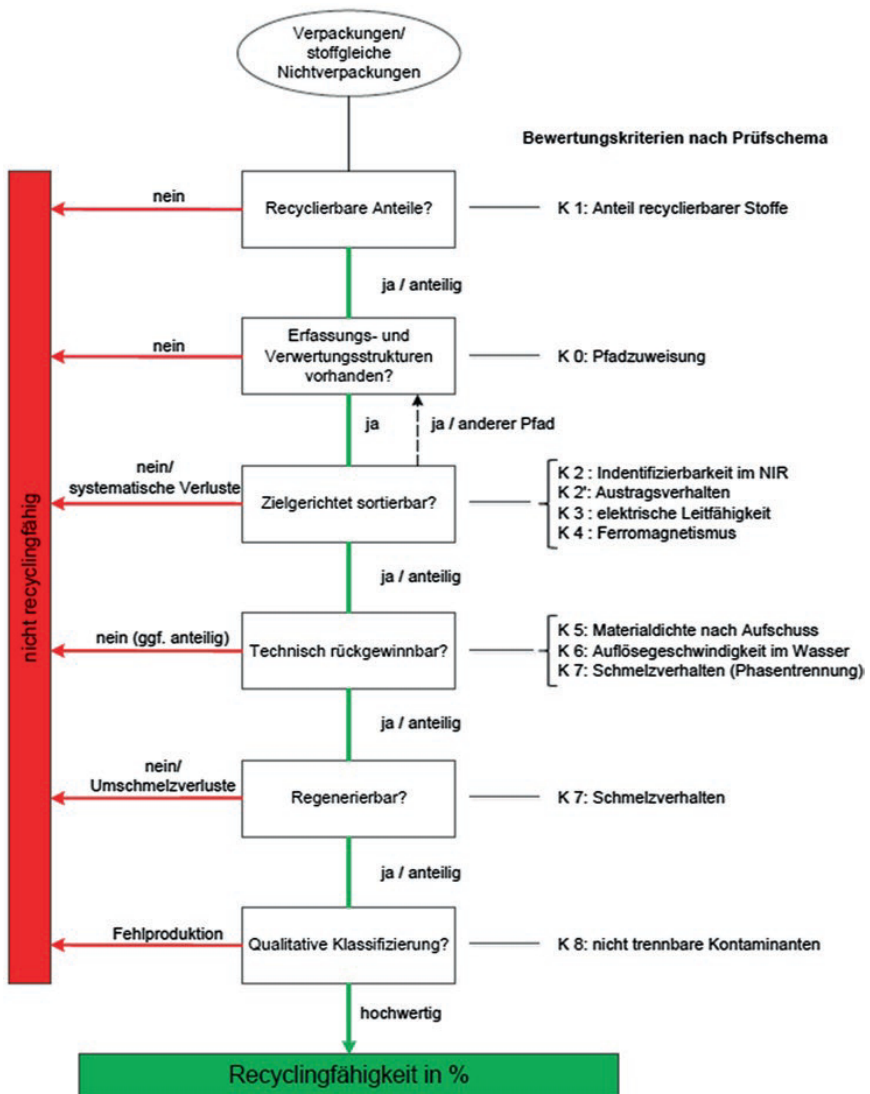


Abb. 24: Bewertungsmatrix für Recyclingfähigkeit nach Christiani [119, S. 13]

Pfad	0 Zuordenbarkeit zu einem Recyclingpfad								
	1 Anteile recycelbarer Stoffe ¹⁾	2 Identifizierbarkeit im NIR ²⁾ / opt. Erkennung	3 wirksame elektr. Leitfähigkeit ³⁾	4 Ferromagnetismus ³⁾	5 Materialdichte nach Aufschluss ²⁾ oder ³⁾	6 Auflösegeschwindigkeit ^{3)/} -grad ¹⁾ in Wasser	7 Schmelzverhalten ¹⁾	8 nicht trennbare Recyclat-Kontaminanten ³⁾	Gesamtbewertung ¹⁾ 1 x 2 x 3 x 4 x 5 x 6 x 7 x 8 in %
1. Kst. Folien	X	-	-	-	X	-	X	X	
2. PE	X	X	X	X	X	-	X	X	
3. PP	X	X	X	X	X	-	X	X	
4. PS	X	X	X	-	X	-	X	X	
5. PET-Flaschen transparent	X	X	-	-	-	-	X	X	
6. MKS-FSK	X	X	X	-	X	-	X	X	
7. MKS-weich	X	(X)	X	-	X	-	X	X	
8. Flüssigkeitskartons (beschichtete Kartonverpackungen)	X	X	-	-	-	X	-	X	

1) Bewertung 0-1 (Restentleerbarkeit ist zu berücksichtigen) | 2) Bewertung 0 bis 1 | 3) Bewertung 0 oder 1

Tab. 17: Auswertungsbeispiel nach Christiani [119, S. 10 (Ausschnitt)]

Mit derartigen Tools ist bereits jetzt eine Quantifizierung der Recyclingfähigkeit produktbezogen und bezogen auf die Polymerart möglich. Zudem lässt sich qualitativ bestimmen, welche Produktteile für ein werkstoffliches Recycling verfügbar gemacht können, wie die Sortier- und Verarbeitungsprozesse darauf abzustimmen sind und welche Sortierreste in die Pfade chemisches Recycling oder thermisch-energetische Verwertung gelenkt werden müssen. Dies zeigt der nächste Bewertungsschritt:

Pfad	Anteile recyclebarer Stoffe	Praktisch nicht recyclebare Komponenten
Kst.-Folien; PE; PP; MKS-FSK; MKS, weich	PO-Anteil	andere Kunststoffe, Etiketten etc.
PS	Polystyrol-Anteil	andere Kunststoffe, Nicht-Kunststoffe, Etiketten
PET-Flaschen – transparent	PET-transparent-Anteil zzgl. PO-Anteile von Verschlüssen	andere Kunststoffe und Etiketten
Kunststoffbeschichtete Kartonverpackungen	Faseranteil	Kunststoff- und Alufolie, Packhilfsmittel, nassfest ausgerüsteter Faseranteil
Weißblech / FE-Metalle	Anteil ferromagnetischer (Legierungs-)Metalle	Kunststoffbestandteil, Etiketten

Tab. 18: Beispiel qualitative Bewertung, Bewertungspfad nach Christiani [119, S. 12 (Ausschnitt)]

Zwischenfazit:

Derartige Basis-Initiativen wie die zum D4R sind immer zweierlei: Sie sind ein Reflex defizitärer Zustände, die die SuV-Unternehmen und Rezyklatanwender in ihrer Entwicklung hemmen. Zugleich sind solche Initiativen aber auch der Ausweg aus der unbefriedigenden Situation.

Eine weitere Initiative der Branche ist der „Runde Tisch Eco-Design für Kunststoffverpackungen“, der 2014 von der *IK Industrievereinigung Kunststoffverpackungen e. V.* ins Leben gerufen wurde [123]. Hier werden Handlungsempfehlungen und Checklisten zum Umgang mit den Zielkonflikten erarbeitet und der Branche angeboten. Auf europäischer Ebene ist die digitale Initiative *MORE MOnitoring Recyclates for Europe* des *Europäischen Verbandes der Kunststoffverarbeiter (EuPC)* relevant. Ziele sind u. a. Hilfestellungen bei der Zertifizierung von rezyklathaltigen Produkten und eine mit der EU-Kommission angestimmte Datenkonsolidierung zum Monitoring von Rezyklatnutzung nach Ländern, Märkten und Polymerarten [126].

Der erreichte Entwicklungsstand bei den Bewertungsinstrumenten für die Recyclingfähigkeit von Kunststoffen scheint eine gute Basis zu sein, um diese Bewertungsinstrumente zu verbindlichen Standards und DIN-Normen für ein ökologisches D4R zu verdichten und damit zu europäischen Steuerungsinstrumenten zu machen.

4.4.2 Hemmnisse bei den rechtlichen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen

Wie oben dargestellt gibt es eine Reihe relevanter rechtlicher Rahmenbedingungen (insbesondere *EG 282/2008 über Materialien und Gegenstände aus recyceltem Kunststoff, die dazu bestimmt sind, mit Lebensmitteln in Berührung zu kommen*). Die Einhaltung dieser gesetzlichen Anforderungen kollidiert – insbesondere im Verpackungsbereich – oftmals mit der möglichen Qualität der Rezyklate und stellt eine hohe Hürde bei der Lebensmittelzulassung dar [14].

Hemmnis Chemikalienrecht

Auch in anderen Anwendungsbereichen müssen Regelwerke (z. B. DIN ISO) erfüllt werden, wodurch der Einsatz von Rezyklaten erschwert wird.

Zum Beispiel die **REACH-Verordnung** der EU von 2007, sie soll ein hohes Schutzniveau für die menschliche Gesundheit und die Umwelt sicherstellen. REACH beruht auf dem Grundsatz, dass Hersteller, Importeure und nachgeschaltete Anwender sicherstellen müssen, dass Chemikalien, die sie herstellen und in Verkehr bringen, sicher verwendet werden.⁶¹ In der Konsequenz bedeutet das, dass **der Anwender von Rezyklaten sicherstellen muss, dass keine Substanzen der REACH-Liste in seinem Produkt enthalten sind**.

Dies ist dem Rezyklatanwender nur auf zwei Wegen möglich nachzuweisen:

- mittels eines lückenlosen Produktpasses, der die Herkunft der Ausgangsstoffe sowie alle Stufen des SuV-Prozesses dokumentiert und Ergebnisse zwischenzeitlicher Materialanalysen enthält,
- zertifizierte Stoffanalysen der Rezyklate bzw. der rezyklathaltigen Produkte zum Ausschluss von enthaltenen REACH-Chemikalien.

Da der Produktpass keine Pflicht ist, sind die Rezyklatanwender davon abhängig, dass sich Hersteller und Händler von Rezyklaten freiwilligen Qualitäts- und Zertifizierungsregeln oder -strukturen unterwerfen, z. B. RAL-Gütegemeinschaften. Deshalb fordern die Verbände der Recyclingwirtschaft die schnelle Einführung eines verpflichtenden digitalen Produktpasses „als Enabler

61 Siehe die komplette Liste der besorgniserregenden Stoffe [127].

der Kreislaufwirtschaft“ [128] zur Vereinfachung der Herkunftsnachweise und Erhöhung der Rechtssicherheit für SuV-Unternehmen, Händler und Rezyklatanwender – vor allem für Rezyklate, die zur Herstellung von neuen Kunststoffverpackungen wiederverwendet werden sollen. Nicht zuletzt soll mit dem Produktpass in der Breite die Basisqualität auf allen Prozessstufen in der SuV-Praxis verbessert werden und zu einer höheren Endqualität der Rezyklate und rezyklathaltigen Produkte führen.

Zusätzlich zu den stofflichen Konformitätserklärungen kommen noch die erforderlichen Nachweise z. B. für das mechanische Einsatzverhalten hinzu. Innerbetriebliche Standards legen bestimmte Eigenschaftsniveaus für die eingesetzten Werkstoffe fest. Wird eine Rezeptur (z. B. durch die Zugabe von Rezyklatanteilen) verändert, zieht das zunächst eine umfangreiche interne Zertifizierung nach sich, bevor z. B. eine europäische Zulassung beantragt wird.

Stoffanalysen zum Ausschluss von REACH-Chemikalien als auch mechanische Produktprüfungen verursachen hohe Kosten entlang der Wertschöpfungskette und wirken dadurch auch als wirtschaftliches Hemmnis für die Rezyklatquote, da zu den dargestellten Kostennachteilen gegenüber Neukunststoffen auf der einen und der thermischen Verwertung auf der anderen Seite auch noch höhere Analytikskosten hinzukommen.

Hemmnis Lebensmittelrecht

Das Lebensmittelrecht als zweites elementares rechtliches Hemmnis für eine höhere Rezyklatquote steht in einem engen Abhängigkeitsverhältnis zum Chemikalienrecht. Da Kunststoffrezyklate direkten Kontakt zu Lebensmitteln nur dann haben dürfen, wenn sie über ESFA-zertifizierte Recyclingverfahren hergestellt wurden, spielen die **Bewertungskriterien der ESFA** eine entscheidende Rolle für eine Verwendung von Rezyklaten im Verpackungsbereich [129]. Eines dieser Kriterien ist der Herkunftsnachweis der Rezyklate. Ein zweites ist der analytische Nachweis, dass die Recyclingverfahren einen Eintrag von REACH-Chemikalien in die Produkte ausschließen. Ein drittes Kriterium ist, dass auch das Produkt selbst frei von REACH-Chemikalien und sonstigen Kontaminationen ist.

Diese faktische Dreifachabsicherung durch die Regelungen der Richtlinie EG 282/2008 macht Zulassungsverfahren für Verpackungsmaterialien kompliziert, langwierig und teuer, zumal immer der Antragsteller in der Nachweispflicht steht, so dass insbesondere kleinere Marktteilnehmer benachteiligt werden.

Recycling- und Verpackungsbranche fordern daher von der Politik, diese Hemmnisse zu beseitigen durch:

- a) Verzicht auf das Kontaktverbot von rezyklathaltigen Verpackungen mit Lebensmitteln bzw. Kosmetikverpackungen, wenn der Herkunftsnachweis, die ESFA-Lizenz für das Recyclingverfahren sowie die Labornachweise für die Unbedenklichkeit der Verpackung vorliegen; d. h. die bislang notwendige Dreifachabsicherung gem. der aktuell gültigen RL 282/2008 würde zu einer zweifachen Absicherung führen,
- b) Anhebung der 5 %-Grenze von Non-Food-Rezyklaten in Food-Verpackungen unter Einhaltung der vorgenannten Qualitätsparameter, [129], [130]
- c) Beschleunigung und Vereinfachung des Zulassungsverfahrens von Verpackungslösungen.

Hemmnis Anerkennung des chemischen Recyclings

Chemisches Recycling von Kunststoffen stellt in der Abfallhierarchie des europäischen Rechts die ranghöhere Alternative zur rein energetischen Verwertung von Kunststoffen dar.

Uneinigkeit herrscht darin, inwieweit sich das thermochemische Recycling auf die verschiedenen im Verpackungsgesetz genannten Quoten anrechnen lässt. Einerseits wird für die Gleichwertigkeit von thermochemischem und werkstofflichem Recycling plädiert, z. B. durch den *Verband der Chemischen Industrie e. V.* [131], andererseits wird dem mechanischen Recycling durch den Gesetzgeber der Vorrang eingeräumt: Nach § 3 Abs. 19 VerpackG gilt, dass bei der werkstofflichen Verwertung stoffgleiches Neumaterial ersetzt wird oder das Material für eine weitere stoffliche Nutzung verfügbar bleibt.

Die explizite Hervorhebung des werkstofflichen Recyclings im VerpackG zielt darauf ab, einen signifikant größeren Anteil der anfallenden Abfälle ebensol-

chen Verwertungsverfahren zuzuführen. Um dies zu unterstützen, sieht das VerpackG auch Anreize für Hersteller vor, ihre Verpackungen recyclingfreundlicher zu gestalten, wobei Recyclingfähigkeit dabei mit Blick auf hochwertige werkstoffliche Recyclingverfahren bemessen wird.

Eine Anerkennung der Gleichwertigkeit des thermochemischen Recyclings mit dem werkstofflichen Recycling ist nach Rechtsauslegung des Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) zu § 3 Abs. 19 VerpackG zum jetzigen Zeitpunkt nicht gegeben, da das Material Kunststoff nicht erhalten bleibt, sondern in andere Stoffe (z. B. Monomere) umgewandelt wird, so dass eine Anrechnung auf die 58,5 %-Quote des werkstofflichen Recyclings (ab 2022: 63 %) nach § 16 Abs. 2 Satz 3 VerpackG nicht möglich ist [132, S. 13].

Unterstellt wird, dass die Anerkennung des chemischen Recyclings die Steigerung der Potenziale beim mechanischen Recycling gefährden könnte und das VerpackG deshalb entsprechend formuliert wurde. Für die Entwicklung des chemischen Recyclings stellt dies jedoch ein Hindernis dar, da Investitionen ggf. nicht zu einer entsprechenden Anerkennung bei der Verwertungsquote und damit zur Wirtschaftlichkeit führen.

Eine Anrechnung des thermochemischen Recyclings für die Erfüllung der 50 %-Recyclingquote der gesammelten Menge gem. § 16 Abs. 4 VerpackG wäre jedoch problemlos möglich, da es nach bisherigen Einschätzungen der bekannten Verfahren unter die Recyclingdefinition fällt. In jedem Fall kann es aber für die Gesamtverwertungsquote von Kunststoffen von 90 % (§ 16 Abs. 2 Satz 2 VerpackG) angerechnet werden, da die Formulierung den Verwertungspfad chemisches Recycling ebenso nicht ausschließt wie die thermische Verwertung. Gefordert wird nur, dass von den besagten 90 % ab 2022 70 % durch werkstoffliche Verwertung sicherzustellen seien. (Problematisch ist hier, dass die Zielvorgabe angesichts der Ausgangssituation unrealistisch erscheint, dass die Differenz von 20 % sowohl für die thermische Verwertung als auch für das chemische Recycling zur Verfügung stehen und dass bei Nichteinhaltung der Vorgaben keinerlei Sanktionen vorgesehen sind.) Auch auf die von der EU durch die VerpackungsRL vorgegebenen Quoten (50 % ab 2025 bzw. 55 % ab 2030) kann das chemische Recycling angerechnet werden, da hier allgemein eine stoffliche Verwertung gefordert wird.

Hier wäre also zu prüfen, inwieweit die Maßnahmen zur Steigerung der Rezyklatqualität (mechanisches Recycling) durchgesetzt werden können, ohne die Entwicklung des chemischen Recyclings zu behindern. So können z. B. alle Anreize zur Steigerung der Recyclingquote und der Rezyklatqualitäten auch für das chemische Recycling zur Anwendung kommen, z. B. über die Beteiligungsentgelte der dualen Systeme, mögliche Sonderabschreibungen für Investitionen oder CO₂-Gutschriften, wenn die gewonnenen chemischen Rohstoffe wieder für die Herstellung von Kunststoffneuware eingesetzt werden.

Auch zur Erfüllung der Quoten für die Verwertung von Siedlungsabfällen der Abfallrahmenrichtlinie nach Art. 11 Abs. 2 (50 % ab 2020, 55 % 2025, 60 % 2030, 65 % ab 2035) bzw. des künftig geltenden Kreislaufwirtschaftsgesetzes kann chemisches Recycling herangezogen werden. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass auch für das chemische Recycling aufwändige Sortier- und Aufbereitungsschritte notwendig sind, um die notwendigen Qualitäten für neue Chemierohstoffe zu erreichen. Dadurch ist jedoch für die Übergangszeit bis zu wesentliche höheren Ausgangsqualitäten eine Verschlechterung der ökologischen und ökonomischen Gesamtbilanz in der Summe beider Verwertungsprozesse, also werkstoffliches plus chemisches Recycling, zu erwarten. Wenn durch Vorgabe ein größerer Teil der angefallenen Kunststoffe stofflich zu verwerten ist, müssen unter sonst gleichen Voraussetzungen auch geringe Inputqualitäten in Kauf genommen werden. Unter dieser Voraussetzung sollten dann für eine Bewertung die oben vorgeschlagenen CO₂-Bilanzen im Vergleich zwischen einer chemischen und der energetischen Verwertung herangezogen werden, um eine eventuell höhere Ökoeffizienz des Gesamtprozesses durch die energetische Verwertung abklären zu können.

=> Lösungsansätze Rechtsrahmen:

- Harmonisierung der rechtlichen Rahmenbedingungen (siehe Zwischenfazit Abschnitt 3.1.3);
- Erhöhung des Grades der Verbindlichkeit für eine reelle Bevorzugung von Sekundärrohstoffen und Rezyklaten gegenüber Primärkunststoffen sowie der stofflichen gegenüber der thermischen Verwertung – z. B. durch Aufhebung von Ausnahmeregelungen, festgeschriebene Rezyklateinsatzquoten, durchgängige CO₂-Bepreisung von virgin materials einerseits und thermischer Verwertung andererseits;

- Ausschöpfen der in den Gesetzen eingeräumten Möglichkeiten, über den Verordnungsweg Teilprozesse und Rahmenbedingungen des Stoffkreislaufes unter ökologischen Gesichtspunkten zu optimieren und ggf. mit sanktionsbewehrten Pflichten zu untersetzen;
- Weiterentwicklung von DIN-Normen und VDI-Vorschriften von „Leitlinien“ hin zu verbindlichen, praktikablen Kriterien für das Design for Recycling, für die Bestimmung von Rezyklatgehalten und für eine auf ökologischen Prämissen basierende Bewertung und Zertifizierung von Sammel- und Verwertungsverfahren;
- Stärkung der Zentralen Stelle Verpackungsregister, ggf. durch Umwandlung in eine Behörde mit erweiterten hoheitlichen Aufgaben, einschließlich Sanktionsmöglichkeiten (z. B. beim Unterlaufen der Verwertungshierarchie in den dualen Systemen; Entwicklung sowie Umsetzung von Bonus-Malus-Systemen etc.).

Bewertung der Wirtschaftsakteure zu rechtlichen Hemmnissen⁶²

Das Nachfragedefizit nach Rezyklaten wird von fast allen befragten SuV-Unternehmen auch mit rechtlichen Hemmnissen begründet. Bei den Rezyklatanwendern sind es zwei Drittel. Als wesentliche Hürden werden genannt:

- ▷ *Lebensmittelrecht*
- ▷ *REACH*
- ▷ *Für die Verwertung in Produkten außerhalb von Verpackungsanwendungen seien es veraltete DIN-Normen im Hinblick auf mechanische Qualitätskriterien.*

Auffallend ist, dass die Rezyklatanwender viel konkreter bei der Ansprache von rechtlichen Hemmnissen sind als die befragten SuV-Unternehmen:

- ▷ *Vorschlag zur Erhöhung der 5 %-Grenze von Nonfood-Rezyklaten in **Lebensmittelverpackungen***
- ▷ *Warum können aktuell nur Rezyklate von zertifizierten Recyclern für **Food Contact Materials** zugelassen werden? Genügt nicht auch ein Unbedenklichkeitsnachweis eines zertifizierten Labors für das jeweilige Rezyklat?*

⁶² Befragung: Fragen 4, 15, 16, 43, 46, 47

- ▷ *Vorschlag zur Aufhebung der Unterscheidung zwischen PIR und PCR im **Lebensmittelrecht** (auf Basis der EU-Liste der zugelassenen Stoffe und der Migrationsprüfung gem. EU-Verordnung 10/2011)*
- ▷ *Vorschlag zur Revision der DIN EN ISO 16103:2055 (Schaffung einheitlicher europäischer Standards für den Rezyklateinsatz bei der Herstellung von Kombinations-IBC und anderen **Gefäßbehältern**; aktuell müsse in jedem EU-Land eine extra Zulassung beantragt und geprüft werden).*
- ▷ *Ausdehnung der Verwendungszulassung von rPET für weitere **Lebensmittelverpackungen** über Getränkeflaschen hinaus;*
- ▷ *erleichterte Zulassung von Rezyklaten einschließlich weiterer, z. B. polyolefinischer Kunststoffrezyklate für **Kosmetikverpackungen** bei Gewährleistung der Produktsicherheit; [133]*
- ▷ *Zulassung chemisches Recycling.*

Die rechtlichen Hemmnisse werden von Seiten der Anwender im erheblichen Maß auf den Wiedereinsatz von Rezyklaten, die im Kontakt mit Lebensmittel stehen, zurückgeführt.

Bei einer Entschärfung oder Aufhebung der genannten rechtlichen Restriktionen sehen die Rezyklatanwender ein Steigerungspotenzial der Rezyklateinsatzquote auf durchschnittlich 40 %.⁶³

Hemmnis Kostennachteile

Kosten im Wettbewerb

Die Herstellung von Rezyklaten steht zum einen in Kostenkonkurrenz zu virgin materials, zum anderen zur thermischen Verwertung.

Die Herstellungskosten und auch die ökologischen Vorteile von Rezyklaten stellen für sich gegenüber virgin materials zunächst kaum ein besonderes Hemmnis dar. Rezyklate werden meist günstiger als Neuware gehandelt, im Premiumbereich unter bestimmten Marktbedingungen aber sogar mit höheren Preisen.⁶⁴ Abb. 25 zeigt eine solche Marktkonstellation: Die Preisentwicklung von rPET im Vergleich zu der von PET-Neuware; selbst der Preis für Nonfood-PET-Fla-

⁶³ Befragung: Frage 49

⁶⁴ „Während sich der Preis für sogenanntes Virgin-PET an den Kosten von Rohöl orientiert und von dessen derzeit niedrigem Marktpreis profitiert, sind die Kosten für recyceltes PET in den vergangenen drei Jahren kontinuierlich gestiegen: Für rPET muss heute rund 20 % mehr gezahlt werden als für das Ursprungsmaterial – auch, weil das Angebot die wachsende Nachfrage nicht deckt.“ [134].

kes hatte Mitte 2021 den Preis von virgin PET überholt. Hintergrund für die zeitweise Abkopplung der Rezyklatpreise von der Entwicklung der Preise für Neuware dürften auch rechtliche Vorgaben für Recyclingquoten sein, gerade bei PET. Wenn nicht genügend Qualitätsrezyklate zur Verfügung stehen, um die Quoten einzuhalten, führt dies zwangsläufig zu Preissteigerungen – was nicht zuletzt als wirtschaftlicher Stimulus für das PET-Recycling wirkt.

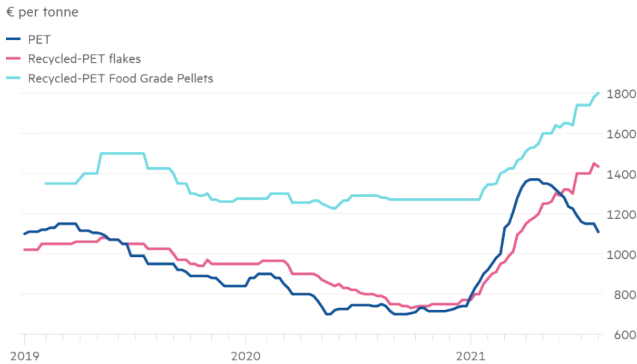


Abb. 25: Preisentwicklung – Vergleich rPET, PET-Flakes und virgin PET [135]

Bei einer gesteigerten Nachfrage (z. B. durch eine gesetzlich vorgeschriebene Mindestrezyklatquote) würde sich der Preis bei gleichbleibender Eignung und Verfügbarkeit der Rezyklate künftig auch bei anderen Kunststoffen verteuern [14]. Stehen der Verwendung von Rezyklaten jedoch sehr hohe gesetzliche Einschränkungen wie z. B. durch das Lebensmittelrecht entgegen, erhöht dies die Kosten für die SuV-Unternehmen infolge des Zusatzaufwandes für die Absicherung der Qualitätsnachweise (zusätzliche Behandlungsschritte, Analytik, Zertifizierungsnachweise etc.). Oder die Rezyklate fließen in Non-Food-Anwendungsfelder mit geringerem Qualitätsanspruch und entsprechend geringeren Erlösen, obwohl kaum Qualitätsunterschiede zur Neuware bestehen. Hier unterlaufen die gesetzlichen Regelungen zur Limitierung von Rezyklatanteilen in Food-Verpackungen faktisch eine Preisbildung auf dem Markt.

Dasselbe passiert unter umgekehrten Vorzeichen bei der Kostenkonkurrenz der Rezyklate zur energetischen Verwertung. Solange die für die Aufbereitung und Verwertung als Ersatzbrennstoff entstehenden Kosten und Risiken unter

denen für die stoffliche Sekundärkunststoffaufbereitung liegen, werden daher Abfallströme maßgeblich in den preiswerteren, thermischen Entsorgungsweg gelenkt. Dies vor allem deshalb, weil der Gesetzgeber den thermischen Verwertungspfad nicht ausreichend limitiert und ihm indirekt Kostenvorteile sichert, z. B. indem er MVA und EBS-Kraftwerke bislang von einer CO₂-Bepreisung ausnimmt oder nicht bereit ist, die Übernahme der Mehrkosten für ein stoffliches Recycling trotz eines damit verbundenen geringeren CO₂-Fußabdrucks zu regulieren.

Anknüpfend an den Überblick über die rechtlichen Rahmenbedingungen in Pkt. 3.1.3 sowie an die zuvor unter 3.4 genannten allgemeinen Hemmnisse für den Einsatz von Kunststoffrezyklaten sollen im Folgenden dezidiert einige der in den Branchen- sowie in den Umweltverbänden und in der Wissenschaft am meisten diskutierten wirtschaftlichen Auswirkungen von gesetzlichen Regelungen betrachtet werden.

Marktversagen

Der geringere ökologische Fußabdruck von hohen Quoten der Rezyklatennutzung und parallel der große CO₂-Fußabdruck von Neukunststoffen aus fossilen Quellen werden bei der Preisbildung auf dem Markt nicht oder nicht ausreichend berücksichtigt. Rezyklate konkurrieren auf dem Markt mit Neuware im Hinblick auf technische Parameter sowie preislich. Bei den Kosten von Neuwareprodukten – vor allem bei Importprodukten und -kunststoffen – sind die Umweltkosten der Herstellung (CO₂-Belastung aus Erdölförderung und -verarbeitung) in der Regel nicht enthalten. In der EU hergestellte Rezyklate dagegen sind entsprechend dem Energieverbrauch in allen Stufen des Kreislaufes mit Energiesteuern und CO₂-Aufschlägen belastet und von dieser Seite her gegenüber der (Import-)Neuware nicht nur von den Qualitätsstandards her, sondern zusätzlich auch kostenseitig benachteiligt. Das zwingt zu umweltorientierten regulierenden Eingriffen bei der preislichen Bewertung von Neuware und/oder beim Rezyklateinsatz.

Eine der CO₂-Bepreisung von fossilen Energieträgern analoge regulatorische Einflussnahme kann und muss an den neuralgischen Punkten der SuV-Praxis und ihrer Randbedingungen ansetzen, um die Abfallströme in die Verwertungspfade mit besserer CO₂-Bilanz und Rohstoffeffizienz zu lenken, um die

wirtschaftlichen Nachteile von hochwertigen Rezyklaten gegenüber Neuware und von Rezyklaten allgemein gegenüber der thermischen Verwertung zu kompensieren und Anreize für Investitionen in den SuV-Unternehmen setzen.

Ansatzpunkt duale Systeme in Deutschland (DSD)⁶⁵

Ausschreibungen und Lizenzierungen von Entsorgungsdienstleistungen durch die gewinnorientierten DSD führen zu einem teilweise ruinösen Preiskampf der SuV-Unternehmen. Trotz durch KrWG und VerPackG geforderter Nachweise von kreislauforientierten Sammel- und Verwertungskonzepten erfolgt die Lizenzvergabe primär nach Preisangeboten, s. § 25 Abs. 5 VerPackG. Der Preisdruck auf die SuV-Unternehmen in Verbindung mit kurzen Vertragslaufzeiten (i. d. R. 5 Jahre für GÜ, für Subauftragnehmer oft kürzer) limitiert betrieblichen Aufwand und Investitionen für bessere Rezyklatqualitäten. Zugleich werden Anreize für eine thermische Verwertung, Abfallexport sowie für illegale Entsorgungspfade und Verschleierung der realen Verwertungsquote gesetzt. Experten schätzen, dass dadurch 20–25 % der Verpackungsabfälle einer lizenzierten Entsorgung entzogen werden [136].

Auch fehlt es für die dualen Systeme an Anreizen zur Abfallvermeidung, der ersten und grundlegenden Stufe der Verwertungshierarchie. Je höher das Abfallaufkommen und je höher der Anteil des einzelnen dualen Systems im Wettbewerb mit den anderen deutschen dualen Systemen am Gesamtabfallaufkommen, umso höher der Umsatz und die Gewinnerwartung. (Für die dualen Systeme könnte theoretisch sogar die angedachte Staffelung der Verpackungsentgelte entsprechend dem Grad des Recyclingaufwandes gewinnoptimierend wirken nach der Maßgabe, je schlechter die Verpackung zu recyceln ist umso höher die Einnahme aus dem Entgelt.) Auch die Verpackungsindustrie hat kein Interesse, weniger Verpackungen zu produzieren, ebenso die SuV-Betriebe sowie die zumeist kommunal betriebenen MVA, die nach Abnahmemengen zur Verwertung vergütet werden. Diesen objektiven Interessenslagen, die der Abfallvermeidung und dem stofflichen Recycling entgegenstehen, muss der Gesetzgeber mit CO₂-Bepreisung, Recyclingquoten Mehrwegvorgaben, Rezy-

⁶⁵ Es gibt ein originäres Duales System Deutschland (DSD), das unter dem Label „Grüner Punkt“ bundesweit die Wertstoffsammlung und -verwertung von PCA organisiert und mit rd. 40 % Marktanteil das größte unter mehreren Dualen Systemen in Deutschland ist. Träger ist die **DSD – Duales System Holding GmbH & Co. KG**. Daneben gibt es weitere DSD-Systeme wie PreZero, Veolia Umweltservice Dual, Remondis, Interseroh u. a.

klateinsatzquoten, Exporteinschränkungen für Abfälle etc. sanktionsbewährt, mit steuerlicher Regulierung und/oder wirksamen Bonus-Malus-Anreizen entgegenwirken, sonst kann die angestrebte Kreislaufwirtschaft unter den aktuellen Rahmenbedingungen nicht umgesetzt werden. Die strukturelle Alternative zur Auflösung der Interessenskonflikte wäre eine Rekommunalisierung der dualen Systeme.⁶⁶

Dies trifft auch auf die o.g. unlizenzierten Entsorgungspfade zu. Einer dieser Pfade läuft zum Handel, insbesondere zu den großen Handelsketten und Getränkeabfüllern. So hat sich aus dem schon immer vorhandenen „**Pfandschlupf**“ ein gewinnträchtiger Geschäftszweig etabliert. Dabei verdienen Handel und Getränkeindustrie an der Differenz zwischen der Rücklaufquote und den in Verkehr gebrachten Getränkeflaschen und -dosen. Die Hersteller von bepfandeten Flaschen und Getränkedosen müssen sich nicht am Dualen System und dessen Lizenzentgelten beteiligen. Wie *GVM* und *NABU e. V.* schätzen, müsste nur für die nicht zurückgegebenen PET-Einwegflaschen ein Lizenzentgelt erhoben werden, dann hätten die Inverkehrbringer ca. 9 Mio. Euro an das Duale System zu bezahlen. Insgesamt beträgt die Marktmenge für bepfandete PET-Einwegflaschen in Deutschland 410 Kilotonnen. Bei Lizenzentgelten in Höhe von 550 Euro pro Tonne PET würde eine Teilnahme des Handels an den Dualen Systemen mit 225 Mio. Euro zu Buche schlagen. Die Betriebskosten des Pfandsystems dürften klar darunter liegen, zumal dem Handel ja noch Einnahmen aus dem Verkauf von PET-Ballenware i.H.v. 48 Mio. Euro zufließen. Letztlich bezahlen die Verbraucher und Steuerzahler diese Zusatzgewinne des Handels. Zudem stehen für die SuV-Unternehmen damit weniger Beteiligungsentgelte zur Verfügung, die dringend für die Modernisierung der Abfallwirtschaft gebraucht werden. In Dänemark bspw. werden die Einnahmen des Handels aus dem Pfandschlupf von Anfang an in einer zentralen Stelle verwaltet und für Ressourcenschutzprojekte ausgegeben [139].

⁶⁶ Die Diskussion um eine Rekommunalisierung der Abfallwirtschaft (sowie weiterer Strukturen der öffentlichen Daseinsvorsorge) läuft seit über 10 Jahren, nachdem das DSD nicht durchgängig nachweisen konnte, dass die kommunalen und überregionalen öffentlichen Interessen über private wettbewerbliche Strukturen durchgesetzt werden können. Indikatoren waren höhere Müllgebühren, steigende Abfallmengen, Insolvenzen von SuV-Betrieben, zunehmende Müllexporte, dysfunktionale Schnittstellen zwischen den kommunalen und privaten Strukturen etc. [137]. Viele Gebietskörperschaften sehen ihre Rekommunalisierung der Abfallwirtschaft als Erfolg an. Verviesen sei hier auf die ausführliche Studie mit einer Auswertung zahlreicher Fallbeispiele von trend:research [138].

=> **Lösungsansätze DSD:**

- Neue regulatorische Ansätze für die DSD zur Förderung der 1. Stufe der Verwertungshierarchie, der Abfallvermeidung, z. B. durch Vergütungssysteme, die sich primär oder sogar ausschließlich an der stofflichen Recyclingquote und nicht nach Annahmemengen bemessen, analog dem System der Niederlande;
- Höhere Gewichtung qualitativer Auswahlkriterien bei der Vergabe von Entsorgungs- und Verwertungsaufträgen entsprechend der Abfallhierarchie und bei der Lizenzierung von SuV;
- höhere Beteiligungsentgelte als Hebel zur Förderung ökologischer Sammel- und Verwertungskonzepte (siehe Ansatz Beteiligungsentgelte im folgenden Punkt);
- längere Lizenzlaufzeiten für SuV-Unternehmen;
- restriktive Umsetzung der Registrierungspflicht für Verpackungen und Kontrolle der DSD sowie des Handels; Beteiligung des Handels am DSD-System; Abschöpfen des „Pfandschlupfs“ durch die DSD oder die Zentrale Stelle auf Basis eines Abgleichs von Pfandeinnahmen und -auszahlungen;
- Verbindliche Vorgaben mit höheren Verwertungsquoten (stoffliches Recycling) und für regelmäßige Pläne zur Vermeidung von Verpackungen, wobei dies im Zusammenwirken mit dem zentralen Verpackungsregister erfolgen könnte, das z. B. mit der Anmeldung von Verpackungen pflichtgemäß Pläne der Inverkehrbringer zur Verpackungsvermeidung und Verbesserung der Recyclingfähigkeit abfordert und ggf. dann auch die Lizenzierung der Verpackung versagen könnte.

Ansatzpunkt Abgabenlast auf CO₂-Verbrauch von Primärkunststoffen

Die strukturelle Benachteiligung von Rezyklaten gegenüber Primärkunststoffen wurde bereits ausführlich dargestellt. Zu klären sind die *Instrumente*, über die der bessere ökologische Fußabdruck von Sekundärkunststoffen honoriert werden kann. In der Praxis dürfte dafür eine auf transparenten Methoden basierende Ermittlung von PCR- und PCI-Anteilen in Kunststoffprodukten die entscheidende Voraussetzung sein.

=> **Lösungsansätze CO₂-Bepreisung:**

- Entwicklung von praxistauglichen Kriterien zur Bestimmung von Rezyklatgehalten auf Grundlage der DIN EN 15343:2008-02 (Überwachung des Ausgangsmaterials, Überwachung und Bewertung des Recyclingverfahrens, analytische Charakterisierung des Rezyklats, Rückverfolgbarkeit der Wertschöpfungskette);
- Aufbau eines Netzes von Zertifizierungsstellen für die Bestimmung von Rezyklatgehalten in Kunststoffprodukten, ggf. unter Einbindung der Zentralen Stelle Verpackungsregister und/oder weiterer existierender Strukturen zur Material- und Produktprüfung;
- „Plastik-Steuer“ – ausschließlich auf die Primärkunststoffanteile eines Produkts; Erhebung über den digitalen Produktpass;
- Veräußerbare Primärkunststoff-Zertifikate analog von CO₂-Zertifikaten bzw. Einbindung von Primärkunststoffgehalten in eine CO₂-Bepreisung unter Nutzung des vorhandenen Systems der CO₂-Zertifikate;
- Steuerbonus auf die Verarbeitung von Rezyklaten (bspw. Rückerstattung der USt., die beim Einkauf der verarbeiteten Rezyklate gezahlt wurde, an den Rezyklatanwender).

Ansatzpunkt Beteiligungsentgelte

Die Beteiligungsentgelte sind ein elementares Steuerungselement für die strukturelle Optimierung der dualen Systeme, für die Wahl und Ausgestaltung der Sammelsysteme und die folgenden Stufen des Wertschöpfungskreislauf bei der Abfallbewirtschaftung. Bis dato zahlen Verpackungshersteller und Inverkehrbringer ein Entgelt für jede Verpackung an die dualen Systeme, wobei sich die Entgelte für jedes Verpackungsmaterial (PPK, Kunststoffe, Aluminium, Glas, GKV, Eisen, Verbundverpackungen, Sonstige) unterscheiden und mengenmäßig abgerechnet wird. Mit dem neuen § 21 VerPackG haben die dualen Systeme nun die Möglichkeit und Pflicht, die Recyclingfähigkeit bei der Höhe der Beteiligungsentgelte zu berücksichtigen, wobei den Systemen dort großer Handlungsspielraum bei der Umsetzung eingeräumt wird.

Die regulatorischen Möglichkeiten der Beteiligungsentgelte werden am besten deutlich durch einen **Vergleich der Grüne-Punkt-Systeme von ausgewählten EU-Ländern**. Die Grundidee des Grünen Punkts stammt zwar aus Deutsch-

land und wurde von den meisten EU-Staaten übernommen. Sehr verschieden ist jedoch die nationale organisatorische Umsetzung. Ebenso sind Abfallaufkommen und das durchschnittliche technische Niveau der SuV-Unternehmen länderspezifisch sehr unterschiedlich. Deshalb ist es schwierig, aktuell die finale Ökoeffizienz der nationalen Entsorgungs- und Verwertungssysteme zu vergleichen. Möglich und aufschlussreich ist jedoch ein Vergleich, wie die Beteiligungsentgelte als Lenkungsinstrument im Hinblick auf die nationale Umsetzung der europäischen Abfallstrategie angelegt sind. Verwiesen sei hier auf eine aktuelle Studie des UBA von 2021 zur Praxis der Sortierung und Verwertung von Verpackungen im Sinne des § 21 VerpackG. [56]. In dieser Studie ist ein umfassender Abschnitt einem Vergleich der Grüne-Punkt-Systeme Europas gewidmet. Bemerkenswert für einen Vergleich im Hinblick auf die Beteiligungsentgelte in Deutschland könnten die folgenden Punkte sein:

=> *Lösungsansätze Beteiligungsentgelte*

- Zahlung landesweit einheitlicher, gewichtsabhängiger Grundverpackungsentgelte durch die Inverkehrbringer, wobei das Entgelt mit jeder zusätzlichen Materialkomponente der Verpackung teurer wird. (Bsp. Frankreich) [56, S. 40]. Alternativ ist eine Klassifizierung auf Basis Sortierbarkeit und Recycelbarkeit möglich (z. B. Italien drei Klassen, Niederlande zwei) [56, S. 45–48].
- Sind zusätzliche Recyclinghinweise auf Verpackungen und Produkten enthalten und kann eine sortenreine Sammlung je nach Kunststoffart nachgewiesen werden, wird das Entgelt gegen Boni verrechnet (in Frankreich z. B. bis max. 24 % des Grundentgelts) [56, S. 39–43].
- Die Verpackungsentgelte fließen in einen zentralen „Verpackungsabfallfonds“, der als zweckbezogener Staatsfonds, also nicht gewinnorientiert agiert. Damit könnte gesichert werden, dass sämtliche Einnahmen aus Verpackungsentgelten für die Vergütung von SuV-Leistungen im Sinne der Abfallhierarchie und auf Basis transparenter Kriterien eingesetzt werden können.
- Aus dem Fonds werden alle Verwertungsdienstleistungen vergütet, allerdings ausschließlich in Bezug auf die Menge der werkstofflich recycelten Abfälle (Beispiel Niederlande). Damit wird auf eine dreifache Lenkungsfunction abgestellt – primär gut recycelbare Verpackungen in den Verkehr bringen, hohe Quote der werkstofflichen Verwertung anstreben und den Anteil der thermischen Verwertung, sofern sie unumgänglich ist, so gering wie möglich halten [56, S. 39–43].

- Inverkehrbringer zahlen ermäßigte Beitragssätze nur, wenn sie einen interaktiven *Recycle Check* für ihre Verpackungen nachweisen können, in dem die Gründe für die Beitragsreduzierung bestätigt werden. Über diesen Check (Bsp. Niederlande) erhalten die Inverkehrbringer aber auch Hintergrundinformationen und Beratungsangebote zu den verschiedenen Aspekten der Sortierung und des Recyclings.
- Überlegenswert wäre eine CO₂-Bepreisung von Sortierresten, die von den SuV-Unternehmen in die thermische Verwertung gegeben werden (Anreiz für größere Sortiertiefe, Reduzierung der Reststoffe und für eine Durchleitung von Sortierresten zum chemischen Recycling). Eine solche CO₂-Belastung auf Sortierreste kann dabei direkt bei den SuV oder indirekt über die Betreiber von thermischen Verwertungsanlagen erfolgen.

Bewertung der Akteure in der Wirtschaft zu Kostennachteilen für Rezyklate⁶⁷

Bei der Frage nach den wichtigsten Hemmnissen für einen Markterfolg der Rezyklate sehen alle Befragten aus der Gruppe der SuV-Unternehmen die gesetzlichen Rahmenbedingungen als erste Ursache an, noch vor dem Hemmnis Qualitätseinschränkungen. Die Gruppe der Rezyklatanwender sieht dagegen in den Qualitätseinschränkungen das größte Hemmnis, die gesetzlichen Rahmenbedingungen liegen mit zwei Dritteln der Stimmen auf dem zweiten Platz.

Die Qualität der Ausgangsstoffe ist für beide Gruppen von elementarer Bedeutung. Für die SuV-Unternehmen sind dies die PCA, für die Rezyklatanwender die Rezyklate selbst. Beide Gruppen sehen fast durchgängig ein zu geringes Angebot an hochqualitativen und ein großes Angebot an minderqualitativen Ausgangsstoffen als enormes Hemmnis an.

Die Fragen nach den wirtschaftlichen Anreizen, die zu einer signifikanten Erhöhung der Rezyklatquoten beitragen könnten, zielten letztlich auf die Kompensierung der Marktnachteile von Rezyklaten. Die Gruppe der SuV-Unternehmen identifiziert sich zumeist etwas mehr mit den gemachten Vorschlägen:

⁶⁷ Befragung: Fragen 23–32 und 55–64. In die Zusammenfassung gehen die Antworten aus der Befragung sowie Antworten aus nachfolgenden Interviews mit Branchenakteuren ein.

- ▷ *Die höchste Zustimmung erhielten die Vorschläge (Reihenfolge = Rangfolge)*
 - ▷ *Sonder-AfA für Investitionen und weitere Förderung von Investitionen*
 - ▷ *Vorteile für rezyklathaltige Produkte bei der öffentlichen Auftragsvergabe*
 - ▷ *Umsatzsteuerreduzierung für Rezyklate*
 - ▷ *vorgeschriebene Mindestquoten für den Rezyklateinsatz*
 - ▷ *C2C-Zertifikate*
 - ▷ *CO₂-Bepreisung von Primärkunststoffen (oder „Plastik“-Steuer).*
- ▷ *Nur etwas mehr als Hälfte der Befragten sprach sich für eine Absenkung der Qualitätsanforderungen bei Rezyklaten aus, obgleich diese als ein entscheidendes Markthemmnis identifiziert worden waren. Alle gemachten Vorschläge wurden jedoch von mehr als der Hälfte der Befragten unterstützt. – Bis auf eine Ausnahme, bei den Rezyklatanwendern befürwortete nur eine knappe Hälfte eine CO₂-Bepreisung auf Sortierreste, die in die thermische Verwertung gehen.*

In den nachfolgenden Interviews wurde allerdings auch deutlich, dass es in beiden Gruppen teilweise noch an Vorstellungen fehlte, wie einzelne Vorschläge im Detail umgesetzt werden könnten. So werden bspw. bei den SuV-Unternehmen die theoretisch möglichen Anreize über Vorgaben für das D4R oder für eine ökologische Neujustierung der Beteiligungsentgelte prinzipiell unterstützt. Aber wie Vorschriften oder organisatorische Strukturen eine verbindliche Durchsetzung ermöglichen sollen, bleibt offen.

Zwischenfazit:

Es handelt sich um einen Komplex von Hemmnissen, die sich z. T. gegenseitig bedingen und eine Erhöhung der Rezyklatquoten in der Kunststoffverarbeitung und insbesondere in der Verpackungsindustrie limitieren.

Glied im Kreislauf	Quantität	Qualität	Aufwand/ Kosten	Hemmnisse
Kunststoff- produkt/ Herstellung	Quantität ist vorhanden PCA, Duale Systeme + PIA + eigene Abfallmengen des Handels	kaum D4R, deshalb häu- fig nicht für SuV-Prozesse geeignet	Rezyklate meist günstiger, aber in der notw. Qual. nicht verfügbar; Anpassung KS-Ver- arbeitung an Rezy- klate (Additive)	D4R; Qualität der Ausgangsstoffe; Funktion; recht- liche Hemmnisse (z. B. Lebensmittel- recht)
Kunststoff- sammlung/ Verbraucher	Holsysteme (gelbe Tonne) = große Erfas- sungsmenge, Bringsysteme (Wertstoffhof, Pfandsysteme) = geringere Er- fassungsmenge	Sortenreine Erfassungssy- steme (Bsp. PET-Flasche) ermöglichen höchste Quali- täten; setzt D4R voraus	Systemkosten der Holsysteme ins- gesamt günstiger, bezogen auf die Rezyklatmenge; Multilayer erhöhen Kosten u. Sortier- reste für energet. Verwertung	Platzbedarf im Haushalt, beim Händler; Unter- scheidbarkeit bei KS-Trennung beim Verbraucher; Pfandschlupf
Sortierer	Sortierkapa- zitäten sind vorhanden	Gemischter Abfall aus komplexen KS = weniger Qualitäts-Rezy- klate möglich. große Mengen Sortierreste	Kosten für Neu- investitionen in die Sortiertechnik müssen durch Rezyklatpreise gedeckt sein (z. B. Farbsortierung)	Kosten; Sortier- technik teilweise veraltet; technische, ver- tragliche, wirt- schaftliche Hemm- nisse (Multilayer; Vertragslaufzeiten; Konkurr. Müll- export)
Recycler	Mengen in hoher Qualität nicht vorhanden	Bessere Tren- nung möglich, dafür mehr Sortierreste Chemisches Recycling bietet ggf. Möglichkeit für virgin grade Materialien	Steigt mit dem „Veredlungsgad“ (Differenz zw. Input- und Rezy- klatqualität) Chemisches Recycling deutlich aufwändiger	Beschränkte Abfallmenge für hochpreisige Rezyklate fehlende Aner- kennung chem. Recycling im Ver- PackG Konkurr. energ. Verwertung
Rezyklat- anwender	Unterangebot hoher Rezyklat- qualitäten, Überangebot niedriger Quali- täten	Kaum Food- Verpackungen o. für Kosme- tika geeignete Verpackungen möglich	Hohe Nebenkos- ten (Zertifizierung, Analytik)	Keine Rezyklat- einsatzquote; rechtliche Ein- schränkungen für Lebensmittel- anwendung

Tab. 19: Hemmnisse für den Rezyklateinsatz (Quelle: eigene Darstellung)

Exkurs 4

Wie ein Zielkonflikt zwischen Wirtschaftlichkeit und Recyclingfähigkeit entstehen kann, zeigt das Beispiel Fortschritt beim Recycling von Getränkekartons, die aus den drei Schichten Kunststoff, Aluminium und Pappe bestehen. Die Recyclingquoten für Aluminium, dem Hauptzielprodukt des Recyclings in diesem Fall, werden zunehmend nicht erreicht, der Kunststoffanteil dagegen wächst [140]. Eine Ursache für diesen Trend dürfte die Verringerung der Schichtdicke des Aluminiums im Folien-Verbund der Getränkekartons sein. Durch die Reduzierung des Aluminiumanteils ist dessen Rückgewinnung letztlich unrentabel. Und mit dem Wegfall des Aluminiumrecyclings lohnt sich auch die Rückgewinnung des Nebenprodukts Kunststoff nicht mehr. Wie in Abb. 26 auf der rechten Seite dargestellt, können durch Bedampfen mit Aluminium Schichtdicken von nur 2 µm erzeugt werden.

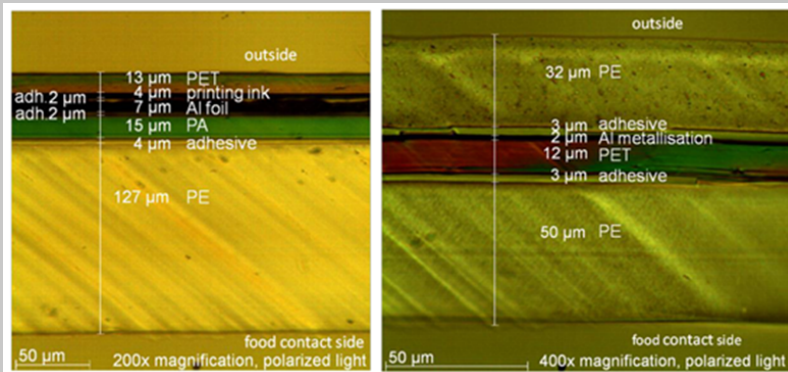


Abb. 26: Mictrom-Schnitte von Multilayer-Folien in polarisiertem Licht [141]

Dieser geringe Aluminium-Anteil ist schwierig herauszulösen und die Rentabilität des Recycling-Prozesses wird damit eingeschränkt. D. h., Hemmnisse beim Recycling können auch systemisch durch ursprünglich sehr nachhaltige Effekte wie die Einsparung von Ressourcen (hier Aluminium) entstehen. Investitionen in Recyclingtechnologien sind also immer mit dem wirtschaftlichen Risiko durch Änderungen in überschneidenden Stoffkreisläufen sowie im Gesamtwirtschafts- und Rechtssystem verbunden.

5 Potenziale der Wiederverwertung von Abfällen aus Kunststoffverpackungen steigern

Grundlegend muss beim Potenzial der Wiederverwertung gefragt werden, was die Zielgröße ist. Dies kann aus Abfallverwertungssicht eine höhere Recyclingquote sein. Sie kann aber auch im Sinne einer circular economy gedacht werden, wodurch die zurückgenommenen Kunststoffabfälle möglichst auf demselben Qualitätsniveau wieder eingesetzt werden sollen. Das Steigerungspotenzial soll deshalb aus beiden Sichtweisen bewertet werden.

5.1 Analyse des Steigerungspotenzials

Aus der Analyse der Hemmnisse geht hervor, dass zunächst vor allem die Qualität der Rezyklate einen entscheidenden Einfluss auf eine verstärkte Wiederverwendung hat. Stünden genügend qualitativ hochwertige Rezyklate für anspruchsvolle Anwendungen, die spezifische werkstoffliche oder genehmigungsrechtliche Eigenschaften erfordern, zur Verfügung, so könnte die Verwendung von Rezyklaten gesteigert werden. Das bedeutet, dass das Steigerungspotenzial insbesondere bei der Herstellung sortenreiner Rezyklate auf Basis verbindlicher, akzeptierter und durchsetzbarer Qualitätsstandards liegt. Um dies zu erreichen, müssten derartige **Qualitätsstandards** festgelegt werden, die für möglichst großvolumigen Anwendungen einen Rückgriff auf Rezyklate erlaubt. Kommen diese Rezyklate aus einer getrennten, sortenreinen Sammlung (z. B. Pfandsystem), so kann zusätzlich die circularity, also die Verwendung in einem geschlossenen Kreislauf gestärkt werden.

Den größten Hebel stellt das **Design for Recycling** dar. Werden Kunststoffprodukte recyclinggerecht konzipiert, dann fällt die Trennung, Sortierung und der Aufbereitungsprozess leichter. Dies betrifft insbesondere die leichtere Aufbereitung aus unspezifischen Kunststoffabfallgemischen und vereinfacht die Trennung. Hier wird sich vor allem die Menge an Rezyklaten erhöhen und durch die leichtere Trennbarkeit der Eintrag von Fremdstoffen senken lassen.

Eine entsprechende Motivation könnte der Ausbau der Produktverantwortung für Verpackungen erreichen. Alle produzierten Verpackungen sollten so gestaltet sein, dass das recycelte Material in die höchstmögliche Anwendung zurückgeführt werden kann und idealerweise im geschlossenen Kreislauf bleibt. Dies kann erreicht werden, indem die Komplexität aller Verpackungen so weit wie möglich reduziert wird, ohne die Funktionalität und die Sicherheit der Verbraucher zu beeinträchtigen. Das bedeutet, dass die hergestellten Produkte so konzipiert sind, dass das recycelte Material in die gleiche Anwendung zurückfließen kann. Eine Vereinheitlichung von Kunststoffprodukten hinsichtlich der Inhaltsstoffe und Merkmale sollte erfolgen, auch wenn dadurch andere anwendungsbezogene Merkmale, wie die Erkennbarkeit einer Marke oder sogar technische Merkmale, dadurch schwächer ausgeprägt werden.

Generell sollten beim D4R die **Leitlinien** bei jedem Produktdesign unter Recyclingaspekten abgefragt und mit den bis dato genutzten Verpackungslösungen abgeglichen werden:

- Verwendung von Monomaterialien
- so wenig Kunststoffadditive wie möglich und nur so viele wie unbedingt nötig,
- keine bzw. helle anstelle dunkler Farben,
- leicht entleerbare Verpackungsbehälter,
- leicht abtrennbare Komponenten (Deckel mit unverklebten Sperrschichten, bedruckte Papier- oder Pappbänderolen, Silikonkleber),
- wenig oder keine Etiketten bzw. Etiketten aus demselben oder aus leicht ablösbarem Material,
- wenig oder keine Druckfarben,
- detaillierte, verbraucherorientierte Hinweise (Marker, Prägungen etc.) an geeigneter Stelle des Produkts bzw. der Verpackung über die verwendeten Verpackungsmaterialien.

Um mit der Vielzahl an Komponenten, die dennoch im Rezyklat auftreten, besser umgehen zu können, kommen unterschiedliche technische Maßnahmen in Frage:

- Zusätzliche Additivierung der Rezyklate
- Blending (Mischung virgin grade mit Rezyklaten)
- Mehrkomponentenverarbeitung (virgin grade innen, Rezyklat außen)
- Schmelzefiltration

Rezyklate als Monomaterialien, die einen Fremdkunststoffanteil kleiner 5 % enthalten können und dennoch den geforderten Spezifikationen (meist weniger anspruchsvolle Anwendungen) entsprechen.

Wo keine Kompromisse möglich sind, muss virgin grade eingesetzt werden. Dieses Virgin-Grade-Material kann aus fossilen Quellen, z. T. aus nachwachsenden Rohstoffen, aber auch potenziell durch das chemische Recycling hergestellt werden.

Für die Herstellung hochwertiger Rezyklate mit definierten werkstofflichen und zulassungskonformen Eigenschaften wäre eine Ausweitung der kontrollierten Sammlung spezifischer, wohldefinierter Kunststoffabfälle sinnvoll. **Spezielle Sammelsysteme** für Kunststoffverpackungen analog zum Glas könnten sortenreinere Fraktionen mit einer geringeren Kontamination gewährleisten. Eine leichtere Unterscheidbarkeit wäre hier notwendig, sodass der Verbraucher das gut unterscheiden kann (z. B. Sammlung transparenter Folien ohne Etiketten; farbige Hartkunststoffe). Auf diesen Weg könnten z. B. gebrauchte Folien oder Kunststoffhohlkörper sortenrein gesammelt und wieder ihren Weg zurück in eine transparente Folie oder Hohlkörper gleicher Qualität finden. Für nicht qualifizierte Kunststoffe in diesen Sammelsystemen sollte eine einfache Möglichkeit zur Entsorgung in jedem Haushalt zur Verfügung stehen, weil nur so eine unsachgemäße Entsorgung ausgeschlossen werden kann (Prinzip: je wertvoller das Material, desto aufwändiger die Entsorgung; je schlechter verwertbar das Material, desto leichter entsorgbar – graue Tonne). Aus der schlechtesten Qualität könnten Sortiertechniken werkstofflich recycelbare Stoffe heraussortieren, bevor der Rest als Ausgangsstoff für chemische Recyclingpfade dienen könnte.

Sammelsysteme lassen sich auch **effektiver gestalten** und Recyclingquoten für Kunststoffe aus Holsystemen (gelbe Tonne) erhöhen, indem z. B. Postconsumer-Leichtverpackungen (PCL) und stoffgleiche Nichtverpackungen (StNVP) zusammen gesammelt werden.

Ein Modellversuch zu einer gemeinsamen Tonne für PCL-Verpackungen und SNVP fand z. B. in Iserloh 2002–2009 statt [142, S. 41–47]. Hier konnte eine Reduzierung der Fehlwürfe seitens der Verbraucher, eine Erhöhung der Erfassungs- und der Verwertungsquote der Kunststoffe sowie eine Verringerung der

Transportkosten nachgewiesen werden, ebenso aber eine Erhöhung des Sortieraufwandes. Trotz des nachgewiesenen Erfolgs im Sinne einer Verbesserung der allgemeinen Recyclingquote wurde das Pilotvorhaben nicht fort- bzw. in anderen Kommunen eingeführt. Hauptgrund war letztlich ein vergaberechtliches Hindernis: Restabfall und PPK liegen in der Hoheit des öffentlich-rechtlichen Entsorgers – der Kommune, PCL-Verpackungen hingegen im Zuständigkeitsbereich der dualen Systeme. Das duale System (privat; hier das SuV-Unternehmen *Lobbe Entsorgung West GmbH*) hatte für die Mitentsorgung von Fraktionen aus der grauen Tonne (kommunal) für diesen Teil des Abfalls die Produktverantwortung und zudem größere Mengen zu bewältigen, aber keine – aus seiner Sicht – ausreichende Vergütung analog der Bezahlung aus den Beteiligungsentgelte des dualen Systems erhalten. (Nicht untersucht wurde, inwieweit die zusätzlichen Erlöse aus mehr und besseren Rezyklaten die Mehrkosten von *Lobbe* durch den zusätzlichen Abfall-Input decken konnten.) Die Kommune, Betreiber der städtischen MVA, mahnte hingegen die Heizwertverluste ihres Mülls an. Das Beispiel zeigt die Fallstricke paralleler Entsorgungsstrukturen und dass ohne eine systemische Herangehensweise unter Einbeziehung aller Stakeholder und ohne regulierende Einflussnahme zur Durchsetzung der ökologisch vorteilhaftesten Lösungen das Kreislaufwirtschaftsprinzip bereits an kleinen Hemmnissen scheitern kann.

Für hochqualitative, möglichst lebensmitteltaugliche Rezyklate bietet sich ein **Ausbau des Pfandsystems** an. Dazu müsste die bestehende Infrastruktur ausgebaut werden (z. B. Supermärkte, Rücknahmesysteme). Derartige Maßnahmen würden vor allem die circularity, die Stoffführung im geschlossenen Kreislauf, erhöhen.

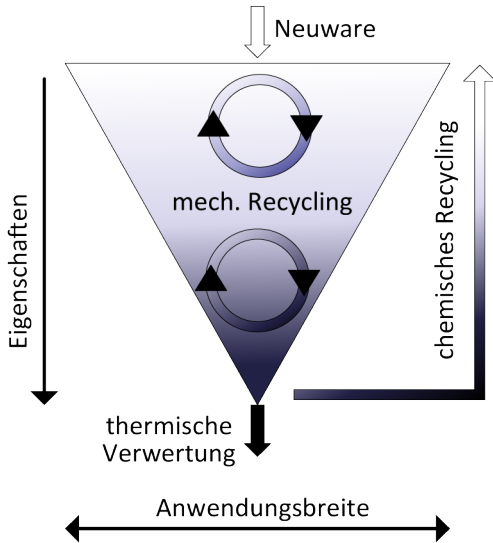


Abb. 27: Einordnung der unterschiedlichen Verwertungsarten in einer Circular Economy unter Berücksichtigung der Qualität und der Anwendungsbreite [5]

Als Ziel für einen Einsatz von Rezyklaten in ihrer originären Anwendung (geschlossener Kreislauf) müsste also die regelkonforme Sammlung und Vermeidung von Kontaminationen im Rezyklat sein.

Als eine Art Wiederverwertungsprinzip kann das C2C-Prinzip angesehen werden, das sowohl ökologisch als auch wirtschaftlich Vorteile bietet. Im Vergleich zum Recycling, bei dem es sich laut Definition um Verwertungsverfahren handelt, die Abfälle zu Erzeugnissen, Materialien oder Stoffen aufbereiten, muss eine Verpackung nach der Nutzung nicht zwingend in den Abfall wandern, sondern kann direkt der Wiederverwertung als nächsten Teilschritt des Lebenszyklus zugeführt werden, wie es bspw. bei PET-Pfandflaschen gut funktioniert.

Ein erster Schritt zur kurzfristigen Verbesserung des Einsatzes von Rezyklaten bzw. Erhöhung der Wiederverwertungsquote wäre aus derzeitiger Sicht, die Umsetzung des Prinzips Cradle-to-Cradle für PET (C2C) in andere Verpackungsanwendungen. Wie in Kapitel 3.3 beschrieben, ist die Recycling-Quote dieses Werkstoffs bereits jetzt so hoch, da mit der SSP Festphasen-Polymerisation eine technologische Lösung existiert, die durch die Nutzungsphase

stattfindenden Alterungsprozesse in Form von Depolymerisation und/oder Kettenspaltung zu kompensieren und einen Wiederaufbau der erforderlichen Molmasse zu realisieren vermag. Weiterhin stehen für PET ausgeklügelte Dekontaminationsverfahren, sogenannte super-clean-Prozesse zur Verfügung, die in der Lage sind, Schadstoffe aus Post-Consumer-Abfällen auf das Konzentrationsniveau von PET-Neumaterialien zu dekontaminieren [143].

Hier kann mit einer sortenreinen PET-Sammlung ein enormer Fortschritt realisiert werden. Alle Verpackungen sind durch den Recycling-Code gekennzeichnet und durch den Verbraucher sofort als PET-Verpackung zu identifizieren.

Nach den Vorbildern in Österreich [144] und der Schweiz [145] führt eine Initiative zur sortenreinen Sammlung von PET zu mehr Ausgangsmaterial für die bereits etablierte Technologie des geschlossenen Stoffkreislaufs (Bottle to Bottle). Die derzeitige Situation mit einer gemischten Sammlung von Verpackungen z. B. über die gelbe Tonne führt dagegen zu einer Vermischung der übrigen Post-Consumer-Abfälle und PET und beschränkt dadurch die Qualität sowohl des PET als auch der anderen Kunststofffraktionen.

Weitere Schritte zur **mittelfristigen** Verbesserung der Anwendbarkeit von Rezyklaten ist die Erhöhung der Qualität. Dies kann im Wesentlichen in drei Bereichen erfolgen: Bei der Gestaltung von Verpackungen (D4R), im Sammelprozess (Vermeidung von Verunreinigungen und/oder Optimierung des Sortierprozesses) und bei den Recycling-Technologien selbst. Hier können durch gezielte Verbesserungen der physikalischen (mechanisch, lösungsmittelbasiert) und chemischen Recycling-Technologien Fortschritte erzielt werden. Nach der Synthese der Polymere sollte bereits bei der Produktion, der Konstruktion bzw. beim Design von Verpackungen aus Kunststoffen die spätere Recyclingfähigkeit berücksichtigt werden. Moderne Entwicklungen im Bereich der Kunststoffverarbeitung, Kunststoffprüfung und -analyse werden ihren Betrag bei der Erhöhung des Anteils an Rezyklaten bei gleichbleibender Qualität der Kunststoffverpackungen leisten (siehe dazu auch Abschnitt 6.2).

Zum Thema Forschung und Entwicklung für die Kreislaufwirtschaft berichtet unter anderem das Fachjournal *Plastverarbeiter* [146] über die Eröffnung eines Labors für additives Kunststoffrecycling. Wissenschaftler des Instituts für Integrierte Produktion Hannover (IPH) wollen erforschen, wie sich Abfälle aus

Thermoplasten aufbereiten, recyceln und per 3-D-Druck zu neuen Produkten verarbeiten lassen. Hierfür wurde am 19. Februar 2021 am Standort Hannover ein neuer Forschungsbereich eröffnet, der den Platz und die nötige Infrastruktur bietet.

Für die **langfristige Perspektive** sei an dieser Stelle noch einmal auf die zusätzlichen Einsatzbereiche für Rezyklate verwiesen, die sich besonders für jene Teile des Stoffstroms erschließen, die nicht durchgängig im Kreislauf geführt werden können, s. die „Renewable Carbon Initiative“ von mehr als 30 großen Unternehmen zur Förderung von alternativen Carbon-Quellen zur Substituierung von fossilem Kohlenstoff aus dem Boden (S. 84). Wie bereits im vorangegangenen Abschnitt zur Technologiereife des mechanischen Recyclings ausgeführt wurde, ist eine 100 %-Kreislauffähigkeit von Verpackungen aus Kunststoff nicht gegeben. Die Verwertung der „Reste“ als alternative Kohlenstoffquelle bedarf schon deshalb der Weiterentwicklung der Verfahren zur thermisch-chemischen Depolymerisation.

Im **Lebensmittelbereich** zeigt sich bereits der Trend, mit der Herstellung lebensmitteltauglicher Rezyklate aus formstabilen Verpackungen, gefertigt aus Monofolien, wieder qualitätsgleiche Verpackungen produzieren zu können. Sie gehören zu den mengenmäßig bedeutsamsten Verpackungstypen für Lebensmittel (ca. 380 kt) [62, S. 15]. Dadurch könnte der geschlossene Recyclingkreislauf im Lebensmittelbereich ausgebaut werden. Konkret sind das z. B. Becher für Molkereiprodukte und Gemüseschalen (zusammen 33 % bzw. ca. 100.000 t/a – Abb. 28 rote Balken), während Folien im Servicebereich (Einwickelfolien) kaum in ihre ursprüngliche Anwendung rückführbar sind, Abb. 28 blaue Balken) [62, S. 14 f.].

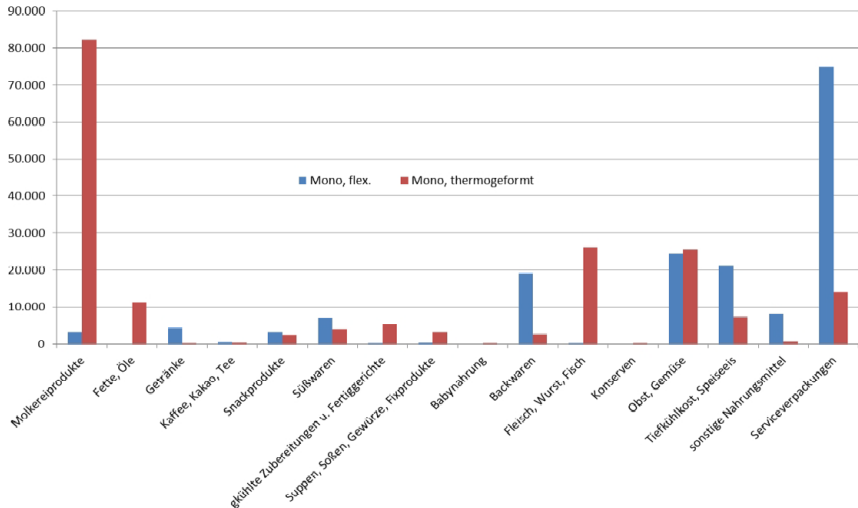


Abb. 28: Zusammensetzung der Verpackung nach Lebensmittelgruppen⁶⁸ [62, S. 15]

Für Kunststoffabfälle, die sich nicht für das werkstoffliche Recycling eignen bzw. in zu großen Mengen und zu schlechter Qualität anfallen, bleibt potenziell (siehe TRL) das chemische Recycling, das wieder Kunststoffe in Neuwarengüte ermöglicht. Dabei werden Füllstoffe, mineralische Fasern und Metalle sowie aus der Gasphase des Prozesses mitgeschleppte Kontaminationen wie Asche- und Schlackepartikel oder auch Halogene mittels einer Produktreinigung (z. B. Hydrierung, Gaswäsche) ausgeschleust, so dass die Polymerisation analog der Herstellung neuer Kunststoffe aus den kurzkettigen Depolymerisationsfraktionen erfolgen kann.

Kunststoffe, die sich derzeit für keinen dieser Verwertungswege eignen, insbesondere Duroplasten und stark kontaminierte Abfälle, sollten weiterhin thermisch genutzt werden.

68 Die Summen der roten und blauen Balken ergeben jeweils 100 %.

5.2 Potenziale bei höheren Toleranzen gegenüber Fremd- und Störstoffen

Um die Qualitäten der Rezyklate zu erhöhen, bieten sich Modifikationen an. Das heißt, die Rezyklathersteller selbst oder zwischengeschaltete sogenannte Compoundierer passen die Rezyklate mit geeigneten Additiven dem Anforderungsprofil des Kunden an (Schlagzähigkeit, UV-Beständigkeit, Einfärbung, Flammenschutz) [10]. Hierzu zählen u. a. Thermostabilisatoren, Lichtschutzstabilisatoren, Flammenschutzmittel, Füllstoffe sowie Antistatika. Durch die speziellen Eigenschaften kommt das Rezyklat ggf. nur für eine bestimmte Anwendung in Frage. Wird zum Beispiel eine für Spritzgussanwendungen erforderliche niedrigere Viskosität eingestellt, ist dieses Material für eine Profilextrusion nicht mehr geeignet. Erfolgt dagegen keine weitere Anpassung der erzeugten Rezyklate, sind die Wiedereinsatzgebiete umfangreicher, jedoch muss der Endproduzent dann ggf. entsprechend aufwändige Anpassungen vornehmen.

Eine Änderung des Eigenschaftsprofils von Rezyklaten muss jedoch nicht zwangsläufig von Nachteil sein. Rezyklate können beispielsweise geringere Maß- und Formveränderungen aufweisen als Neuware. Das nutzen zum Beispiel Automobilhersteller und setzen entsprechende Rezyklate (z. B. faserverstärkte PA-Rezyklate) in Anwendungen wie Stoßfängerbefestigungen und Scheinwerfergehäusen ein. Je näher der neue Einsatzzyklus eines rezyklierten Kunststoffes an dem ursprünglichen Verwendungszweck ist, desto weniger Probleme bereiten die Additive in den folgenden Recyclingzyklen bzw. sind sogar von Vorteil.

Waschmittelflaschen z. B. bestehen vielfach aus sehr gut wiederverwertetem Kunststoff. Forscher am Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF haben gemeinsam mit Unternehmen gezeigt: Rezyklierter Kunststoff hat eine ähnliche Performance wie Neukunststoff – und eignet sich auch als Werkstoff für Basisträger, z. B. das Grundgerüst von Spülmaschinen [147].

In unserer Befragung wurden die Teilnehmer aufgefordert, Anwendungsbeispiele für den Rezyklateinsatz aus ihrer beruflichen Praxis zu benennen⁶⁹. Die meist genannten Anwendungsfälle waren: Verpackungsfolien, Parkbänke, Rohre, textile Fasern, Ergänzung von Neuware.

Ein nachfolgendes Interview mit der APK GmbH Merseburg ergab folgende spezielle Einsatzfelder für mittels NewCYcling hergestellter Regranulate:

- ▷ LDPE NCY – Einsatz hauptsächlich für Folien-Blas- und -Cast-Prozesse, die Folien wiederum werden für flexible Verpackungen vor allem bei Non-Food-Anwendungen eingesetzt.
- ▷ PA NCY – Einsatz als Spritzgusstype für Dübel, Clips, Chips etc.
- ▷ Das LDPE RCY, ein Granulat aus der mechanischen Recycling-Produktionslinie ohne Einsatz des Solvolyse-Verfahrens, eignet sich eher für Down-Cycling-Anwendungen wie z. B. Müllbeutel.

Ein weiteres Interview mit der Fa. ALPLA ergab unter anderem einen großen Anteil an Food-Anwendungen aus dem PET-Flaschenrecycling, wo eine Wiederverwendung der Rezyklate im originären Anwendungszweck möglich ist, wobei i. d. R. Rezyklate mit Neuware gemischt werden.

Beim PET-Recycling kann zusätzlich zum klassischen Recyclingprozess zur Verbesserung der Qualität eine Festphasenpolymerisation erfolgen (Abb. 29).

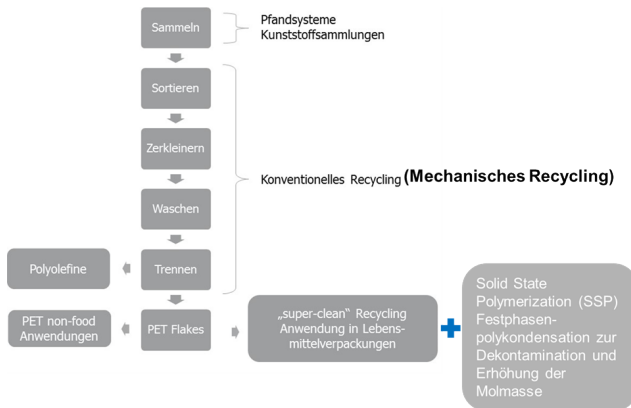


Abb. 29: Prozesskette des PET-Recycling für Food-Anwendungen [148]

Diese kann an beliebigem PET-Material, z. B. an Flakes aus der Flaschenrücknahme durchgeführt werden, um das Molekulargewicht bzw. die Viskosität an den Anwendungsfall anzupassen bzw. diesbezügliche negative Auswirkungen aus der Gebrauchsphase auszugleichen. Bei der SSP wird das PET auf Tem-

peraturen von 180°C bis 240°C für 5 h bis 30 h unter Inertgas- oder Vakuumatmosphäre erhitzt, wobei sich die Parameter nach dem Ausgangswert der Viskosität und dem erforderlichen molekularen Aufbau richten. PET-Regranulate können, also nach derzeitigem Stand der Technik durch dieses Verfahren in einen Zustand überführt werden, der Neuware gleichkommt. Dieses Potenzial wird jedoch nicht vollständig ausgeschöpft. *Kauertz* und *Detzel* kritisieren, dass aktuell in Deutschland sekundäres PET-Material nicht optimal genutzt wird [60]. Denn der aktuelle Stofffluss von PET in Deutschland ist faktisch eine Kaskade, aber noch kein Kreislauf. Das aus PET-Getränkeflaschen gewonnene Sekundärmaterial geht mehrheitlich in andere Anwendungen mit einer deutlich geringeren bzw. sogar schlicht nicht vorhandenen Verwertungswahrscheinlichkeit im Sinne einer materialspezifischen Aufbereitung für weitere Einsatzzyklen. So wird höherwertiges rPET dem virgin PET bei der Herstellung von PET-Getränkeflaschen beigemischt, aber ein größerer Teil wird als mittlere oder geringere rPET-Qualität anderweitig verwendet. Mit 32 % sind Schalen und Verpackungsfolien der größte Absatzmarkt in Europa für rPET, gefolgt von Flaschen mit Lebensmittelkontakt mit einem Anteil von 29 %. Der restliche Anteil an recyceltem PET wird für Fasern (24 %, Kleidung, Regenschirme, Kinderwagen, Rucksäcke etc.), Umreifungsbänder (8 %) und für den Spritzguss (1 %) verwendet, übrige Anwendungen (2 %) [149]. Somit gehen mehr als zwei Drittel des PET-Sekundärmaterials nach nur einer, maximal zwei Weiternutzungsstufen dem Wertstoffkreislauf verloren.

Ein positives Beispiel für die Nutzung von rPET für Food-Verpackungen ist die Fa. *Alnatura*. Sie nutzt bereits einige Verpackungen aus bzw. mit einem großen Anteil von rPET und hat die Kunststoffschalen einiger veganer Convenience-Produkte umgestellt. Die Verpackungen haben nun einen Anteil von 57 % rPET aus dem PET-Flaschenrecycling [150]. Die italienisch-britische Firma *ambpackagin* z. B. stellt Verpackungsfolien mit einem Anteil von 50 – 100 % rPET-Anteil her [151]. Ähnliche Beispiele sind auch von anderen Lebensmittelherstellern bekannt.

Ein weiteres Beispiel zur Verwendung von Rezyklaten kann die Verwendung von Rezyklaten in Multilayerverpackungen sein. Um eine Migration aus dem Recyclinganteil in die Neuware und dann in die Lebensmittel gesetzeskonform zu verhindern, müssten ggf. Barrierschichten aus Food-zugelassenen Kunst-

stoffen zum Einsatz kommen, die dann u. U. wiederum die Recyclingfähigkeit des Materials negativ beeinflussen. Die Vermischung von Recyclingkunststoffen mit Neuware führt langfristig zwangsläufig zu schlechteren Qualitäten und damit zu einer Limitierung des Materialkreislaufes.

Deshalb sollten verbindliche, akzeptierbare und durchsetzbare Qualitätsstandards für Rezyklate im Hinblick die Zumischung von Rezyklaten zu Neuwareprodukten oder umgekehrt eingeführt werden [14]. Diese Standards sollten nicht nur quantitative Rezyklatquoten definieren, sondern über mechanische, thermische und chemische Werkstoffparameter des finalen Produkts Rückschlüsse auf die Qualitätsveränderungen der Produkte infolge des Rezyklateinsatzes abbilden können.

Nicht zuletzt sei auch das Produktdesign genannt. Beim Verbraucher kann die Akzeptanz hinsichtlich Rezyklate gesteigert werden, wenn deren ökologischer Nutzen hervorgehoben und transparent gemacht wird. Die Verpackung selbst muss zum Beispiel nicht glasklar sein und eine graue Verpackung widerspricht nicht zwingend ihrer Primärfunktion, dem Schutz der Ware.

Exkurs 5

Kunststoffverpackung vs. Verpackung aus Glas, Papier, Holz, Jute oder Metall

Vor dem Recycling sollten beim Streben nach einer nachhaltigen und ökologischen Wirtschaft immer die vorgelagerten Schritte „Prävention“, „Minimierung“ und „Wiederverwertung bzw. Wiederverwendung“ gefördert und unterstützt werden (siehe Abb. 30). Allerdings ist eine Minimierung des Kunststoffeinsatzes bei Verpackungen durch den Einsatz von alternativen Verpackungsmaterialien nicht immer zielführend. Verpackungen aus sogenannten nachwachsenden Rohstoffen wie Papier, Holz oder aus dem vermeintlich hervorragend zu recycelnden Werkstoff Glas haben oftmals einen schlechteren CO₂-Foot-Print. Auch die Ressource „Boden“ für biobasierte Verpackungsmaterialien steht, ähnlich wie die fossilen Rohstoffe, nicht unbegrenzt zur Verfügung.

In einer Studie analysierte die Wiener Umweltberatungsfirma „denkstatt“, welche Auswirkungen der Ersatz sämtlicher Kunststoffverpackungen durch alternative Werkstoffe (Metall, Glas, Holz, Papier) haben würde und kam zu dem Ergebnis, dass dabei mit mehr als einer Verdoppelung des Energieverbrauchs und einer fast Verdreifachung der Emission von Treibhausgasen zu rechnen wäre [152, S. 9].

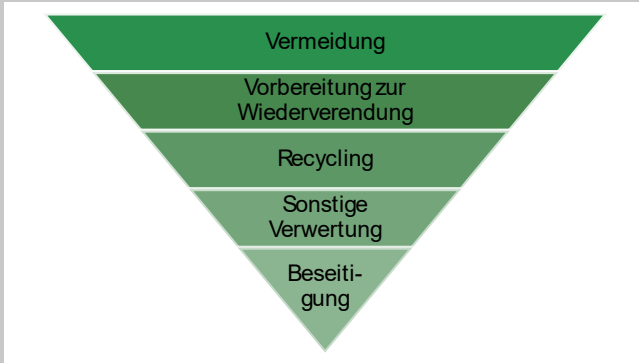


Abb. 30: Recycling-Pyramide gem. § 6 KrWG (Quelle: eigene Darstellung)

Dies wird durch das Heidelberger Ifeu-Institut für Energie- und Umweltforschung bestätigt, das regelmäßig unterschiedliche Verpackungsmaterialien für Produkte aller Art auf Basis einer komplexen Ökobilanzierungsmethode unter Einbeziehung aller direkten und indirekten Umweltauswirkungen vergleicht (z. B. [153, S. 9]).

So hat z. B. eine Dünnschichtkunststoffolie für die Verpackung von Käsestücken und vergleichbarer Frischware den geringsten CO₂-Fußabdruck gegenüber allen anderen infrage kommenden Verpackungsmaterialien. Ebenso ist ein Folienbeutel die ökologisch günstigste Verpackung für Waschmittel und ein PE-Schlauch die für Milch. Bei Getränkeverpackungen sind PET-Mehrwegflaschen besser oder gleichwertig gegenüber Mehrwegflaschen aus Glas. Hauptgründe sind das wesentlich geringere Transportgewicht von PET, die Bruchfestigkeit und eine um über 800° geringere Temperatur für das Wiederaufschmelzen und Blasformen neuer Flaschen.

Tetrapacks sind ökologischer als PET-Einwegflaschen, die bei einer hohen Recyclingquote wiederum günstiger sind als Einwegsysteme aus Glas oder Weißblech [2]. Bei Einwegbechern für Heißgetränke weist der Polystyrolbecher gegenüber Pappbechern gemäß einer UBA-Studie von 2019 die mit Abstand bessere Ökobilanz nach [4, S. 94].

Eine Tragetasche aus Papier ist einer gleichgroßen aus Kunststoff unter ökologischen Gesichtspunkten nur dann überlegen, wenn sie weniger als das Doppelte an Gewicht hat. Ein Jutebeutel muss gemäß einer britischen Studie von 2011 durchschnittlich mindestens 131 Mal in Gebrauch genommen werden, um eine bessere Ökobilanz als eine Kunststofftragetasche aus PE-HD zu erreichen. Wird diese mehr als dreimal genutzt, benötigt der Jutebeutel schon 393 Ingebrauchnahmen für die gleiche Ökobilanz [154]. Ist die PE-HD Tasche nach einer Schweizer Studie von 2014 zu mind. 80 % aus Rezyklat hergestellt, hat der CO₂-Foot-Print des Jutebeutels einen Faktor von 56 gegenüber der PE-HD-Tasche [155]. Hauptgründe sind hier der hohe Wasser-

verbrauch sowie der Pestizideinsatz beim Anbau der Baumwolle, der Transportaufwand für den Import der Baumwolle (viel Volumen, wenig Masse) sowie der Chemikalieneinsatz beim Finish in der Baumwollverarbeitung.

Neben dem Gebot der Verpackungsvermeidung gilt generell: Je geringer die Masse an Verpackung im Verhältnis zur Produktmasse und je höher der Rezyklat-Anteil beim Verpackungsmaterial und je kürzer die Transportwege der Produkte vom Hersteller zum Endkunden, umso geringer der gesamte ökologische Foot-Print der Produkte. Das trifft nicht nur für Kunststoffverpackungen, sondern für alle Verpackungsmaterialien zu.

5.3 Potenziale bei gesetzlichen Regelungen und Steuerungsinstrumenten

Die Potenziale zur Verbesserung der rechtlichen Rahmenbedingungen ergeben sich aus den beschriebenen Hemmnissen sowie aus den Forderungskatalogen der Branchenakteure, der Umwelt- und Verbraucherverbände sowie aus den Empfehlungen der Wissenschaft an die Politik. In vielen Punkten sind diese Forderungen und Vorschläge sogar deckungsgleich und sollten daher auch zu einem gesetzgeberischen Konsens umgesetzt werden können. Wichtig ist allerdings die grundlegende Entwicklungsrichtung.

Beim **Chemikalienrecht** sind Umwelt- und Branchenverbände im Punkt der erweiterten Produktverantwortung allerdings noch weit auseinander. Die SuV-Unternehmen haben das objektive Problem, dass das Denken vom gesamten Stoffmix her den realen abfallwirtschaftlichen Verhältnissen kaum gerecht wird. D. h., die Risiken, die sich für den SuV-Prozess aus der Komplexität der Kunststoffabfälle der Gemischtsammlung mit der Gelben Tonne ergeben, sind in der Praxis schwer und in vollem Umfang zu überschauen. Abfallerzeuger und -besitzer laufen permanent Gefahr, Ordnungswidrigkeits- und sogar Straftatbestände zu erfüllen, wenn sie bei der großen Anzahl der Einzelstoffe eine falsche Einstufung von Abfallschlüsselnummern, Schadstoffklassen oder Verwertungspfaden vornehmen und dabei gegen die Auflagen im Sinne der erweiterten Produktverantwortung verstoßen. An der REACH-Liste der gefährlichen Stoffe wollen die SuV-Unternehmen dabei gar keine Abstriche machen. Im Gegenteil, sie unterstützen z. B. die Initiativen, REACH-Regeln betr. Mikroplastik oder Nanopartikeln in der Kunststoffanwendung zu erweitern [156], [157].

Aber: Das Chemikalienrecht verpflichtet dazu, eigentlich nicht gefährliche Kunststoffabfälle, wie bspw. gelbe Säcke/Tonnen (Verpackungen der ASN 150102), durch Umschlüsselungen zu „gefährlichen Abfällen“ (Verpackungen mit potenziell gefährlichen Rückständen gem. ASN 150110*) umzudeklariieren. Grund dafür ist Art. 6 REACH-Verordnung, lt. dem alle Stoffe, als solche oder in Gemischen, die in Mengen ab einer Tonne pro Jahr und Unternehmen hergestellt oder aus dem EU-Ausland importiert werden, bei der ECHA durch die Unternehmen registriert werden müssen. Eigentlich findet die Abfallmatrix, die für die weitere Entsorgung von Abfällen entscheidend ist, im Stoffrecht keine Anwendung, da alle Kunststoffe des Gemischs bereits eine REACH-Zulassung haben. Probleme machen jedoch die aus dem Abfall in die Rezyklate mitgeschleppten geringen Mengen von Füllstoffen, Flammschutz- oder Oxidationshemmern, obwohl sie diese Rezyklate nicht zwingend zu einem gefährlichen Stoff machen, da die Additive ja chemisch und i. d. R. emissionsfrei in den Kunststoffen gebunden sind. Das Stoffrecht jedoch betrachtet ausschließlich den einzelnen Stoff in der Mischung und der kann für sich genommen durchaus gefährlich sein, wie z. B. der häufig (vor allem in PS-E) vorkommende Flammschutzhemmer HBCD. Die variable Zusammensetzung der Kunststoffe mit definierten ASN führt seitens der Aufsichtsbehörden mithin dazu, dass die statischen Beschreibungen des Chemikalienrechts worst-case-Szenarien abbilden und daher ein gemischter Kunststoffabfall unter Umständen als gefährlich eingestuft werden muss. Gibt das SuV-Unternehmen bei der Stoffanmeldung im Zweifelsfall vorsorglich unsichere Inhaltsstoffe wie z. B. HBCD an, führt dies zwingend zur Einstufung als gefährlicher Abfall, die eine Umdeklarierung in der ASN nach sich zieht. Neben dem bürokratischen Mehraufwand für die ECHA-Anmeldung und – nach dem SuV-Prozess – für die Entlassung der Rezyklate aus der Abfalleigenschaft erhöhen sich natürlich sofort auch die Anforderungen an den Umgang mit dem vermeintlichen Gefahrgut. Nicht zuletzt wird die Verkäuflichkeit derartiger Rezyklate erschwert, selbst wenn sie gerade durch die aus dem Abfall eingebrachten Additive im Einzelfall vielleicht sogar bessere Eigenschaften gegenüber Vergleichsprodukten haben.

Hinzu kommt die Tatsache, dass sich mit der unterschiedlichen Zusammensetzung der Abfälle der relevante Abfallschlüssel von Annahmestelle zu Annahmestelle ändert und es keine einheitliche Rechtsauslegung bei der ASN-Klassifizierung gibt.

Der Gesetzgeber ist hier auf nationaler wie europäischer Ebene also gefordert, Abfall- und Chemikalienrecht kompatibel zu machen und auszutarieren, wie mittels standardisierter, transparenter Bewertungsmethoden eine stoffbezogene Klassifizierung der Abfälle und der aus Abfall hergestellten Produkte möglich gemacht und eine bloße „Chemisierung des Abfallrechts“ vermieden werden kann. Kernfrage ist die Produkt- sowie die Verfahrenszulassung durch die ECHA bzw. ESFA auf der Basis von REACH und CLP und eines daraus abgeleiteten Katalogs zugelassener Zuschlagstoffe für Kunststoffe sowie die darauf zu gründende Entlassung von Stoffen aus der Abfalleigenschaft [158].

Ein äußerst hilfreiches, weil transparentes Instrument könnte hier der digitale Produktpass für alle Rezyklate sein, der neben der Herkunft die wesentlichen Inhaltsstoffe und deren Zulässigkeit dokumentiert. Mittel- und langfristig lässt sich Produktsicherheit mit hohen Rezyklatqualitäten und -quoten allerdings am effektivsten über ein konsequentes D4R, sortengerechte Getrennsammlung und Pfandsysteme sowie hohe Sortier- und Verarbeitungsqualität im SuV-Prozess sicherstellen.

Im **Lebensmittelrecht** beruht das Potenzial auf der mittlerweile in der EU weit entwickelten Struktur der Produkt- und Lebensmittelüberwachung sowie der etablierten Registrierungsprozesse und Regeln für Konformitätsnachweise. Auf dieser Basis sollte es möglich sein, die *Richtlinie EG 282/2008 über Materialien und Gegenstände aus recyceltem Kunststoff, die dazu bestimmt sind, mit Lebensmitteln in Berührung zu kommen*, so zu novellieren, dass

- Zulassungsverfahren für Verpackungsmaterialien auf Basis eines verbindlich einzuführenden digitalen Produktpasses einfacher und schneller realisiert werden können; dabei sollten/können die Einstufungsmethodik von CLP sowie die Datenbanken von ESFA und insbesondere ECHA genutzt werden;
- Branchenakteure verbindliche und transparente Zulassungskriterien für die Erteilung der ESFA-Lizenz für Recyclingverfahren erhalten, die die neuesten technologischen Entwicklungen, einschließlich der KI, berücksichtigen und das chemische Recycling mit einbeziehen;
- Verbraucher die wesentlichen Produkt- bzw. Verpackungsdaten über ein auf der Zulassung basierenden Produktlabel gem. der DIN SPEC 91446:2021-10 erhalten können;

- mit einem vereinfachten und schnelleren Registrierungsprocedere auch Mengenobergrenzen, ab denen Verpackungen registrierungspflichtig werden, im Sinne der Verbrauchersicherheit abgesenkt werden können;
- das Kontaktverbot von rezyklathaltigen Verpackungen für Lebensmittel bzw. Kosmetikverpackungen aufgehoben wird, wenn der Herkunftsnachweis, die ESFA-Lizenz für das Recyclingverfahren sowie die Labornachweise für die Unbedenklichkeit der Verpackung vorliegen;
- eine Anhebung der 5 %-Grenze von Non-Food-Rezyklaten in Food-Verpackungen unter Einhaltung der vorgenannten Qualitätsparameter möglich wird.

Mit einer Rechtsharmonisierung des EU-Rechts⁷⁰ sind auf dieser Grundlage auch mittelfristig verbesserte Regelungen im deutschen KrWG und dem VerpackG einfacher möglich umzusetzen.

Kurz- bis mittelfristig (binnen einer Legislaturperiode) könnten die folgenden rechtlichen Schwerpunkte angegangen werden:

- schnellere Entlassung von Abfallprodukten aus dem Abfallrecht durch geeignete Qualitätsnachweise; dies betrifft insbesondere die in § 5 (2) KrWG genannten Rechtsverordnungen,
- die Einbindung des chemischen Recyclings als wichtiger Recyclingpfad zwischen werkstofflicher und energetischer Verwertung,
- die Stärkung der *Zentralen Stelle Verpackungsregister* i. S. von Vorgaben oder Restriktionen, die zu einer Verbesserung der Recyclingquote und Erhöhung der Rezyklatqualität beitragen, siehe § 26 (1) Pkt. 11, 17, 23 – 26 VerPackG,
- Verordnungen zur Ausschöpfung der Möglichkeiten des § 21 (1) VerpackG (Anreize über Beteiligungsentgelte) zur Verbesserung der Recyclingquote und -qualität,
- die Erhöhung der Verbindlichkeit des § 45 KrWG in Bezug auf die Bevorzugung von rezyklathaltigen Produkten bei der öffentlichen Auftragsvergabe und entsprechende Harmonisierung mit der VgV und UvGO,

⁷⁰ Betrifft im **Abfallrecht** die REACH-Verordnung sowie die Richtlinie 2008/98/EG vom 19.11.2008 über Abfälle und folgende geänderte Fassungen (ABl. L 312 vom 22.11.2008, S. 3, L 127 vom 26.05.2009, S. 24, L 297 vom 13.11.2015, S. 9, L 42 vom 18.2.2017, S. 43), einschließlich zuletzt geändert durch EU-Richtlinie 2018/851 (ABl. L 150 vom 14.6.2018, S. 109). Betrifft weiterhin die **EU-Lebensmittelverpackungsverordnungen** 282/2008 vom 17.03.2008 (ABl. L 86 S. 9) und die folgenden geänderten Fassungen 2019/37 vom 10.01.2019 (ABl. L 9 S. 88) sowie 2020/1245 vom 02.09.2020 (ABl. L 288 S. 1).

- Einführung von Verbindlichkeitsklauseln für ein recyclinggerechtes Verpackungsdesign ins VerPackG; fortzuschreiben ist dafür der „Mindeststandard für die Bemessung der Recyclingfähigkeit von systembeteiligungspflichtigen Verpackungen gemäß § 21 Abs. 3 VerPackG“, [56]
- ein verbindliches Recycling-Label auf Basis verbindlicher Qualitätsstandards für Rezyklate,
- eine verbindlicher digitaler Produktpass als Basis für das Recycling-Label,
- Durchsetzung der Bewertung und Präferenzierung von Verpackungslösungen und Recyclingpfaden auf Basis von wissenschaftlich basierten LCA und CO₂-Food-Print-Analysen,
- generelle Einbeziehung der MVA in die Regelungen des BEHG.

Vom Ansatz her hat sich der Gesetzgeber in beiden Gesetzen die Möglichkeit eingeräumt, auf dem Verordnungsweg alle notwendigen, zielführenden Detailregelungen zu erlassen (Teil 4 KrWG; § 26 (1) 11 VerPackG). Dazu könnte auch die **kurzfristige** Einführung neuer bzw. Schärfung vorhandener *rechtlicher Steuerungsinstrumente* gehören, die hier noch einmal zusammengefasst werden:

- Vorgabe verbindlicher Recyclingquoten
- Vorgaben von Mehrweganteilen
- Vorgabe von Mindest-Rezyklateinsatzquoten für Kunststoffverarbeiter, Verpackungshersteller und Inverkehrbringer
- Verpflichtender digitaler Produktpass und darauf basierendes Recycling-Label
- Verbindliche DIN- und VDI-Vorschriften für das D4R
- rechtlich verankertes zentrales Fondsmodell für die Verpackungsindustrie und/oder Erlass von C2C-orientierten Kriterien für die Verteilung der Beteiligungsentgelte.

Zu den *rechtlichen* könnten ebenso **kurzfristig** noch *fiskalische Steuerungselemente* für die Förderung der Rezyklateinsatzquoten und der Entwicklung der technischen Basis der SuV-Unternehmen kommen:

- Sonderabschreibungen für Investitionen in SuV-Betrieben
- Plastiksteuer auf Einsatz von Primärkunststoffen oder/und steuerliche Abschläge bzw. Abschläge beim Verpackungsentgelt bei der Verwendung von Rezyklaten

- Abschläge beim Verpackungsentgelt bei produkt- bzw. verpackungsbezogener Aufklärung der Verbraucher
- CO₂-Beaufschlagung von Sortierresten, die in die thermische Verwertung gehen.

5.4 Potenziale der KI und Digitalisierung

Es wird untersucht, wie die **Digitalisierung** zu einer besseren Wirtschaftlichkeit z. B. über Logistikketten und digitale Marktplätze beitragen kann. In diesem Bereich wird eine große Effizienzsteigerung erwartet.

5.4.1 Erkennung/Sortierung

Die Nutzung von automatischen Erkennungssystemen (Auto-ID) zur Sortierung von Kunststoffen ist seit geraumer Zeit weit verbreitet. Sie werden sowohl in Bringsystemen (Flaschen-Pfand-Systemen) als auch in Holsystemen (z. B. NIR-Systeme zur Sortierung von Kunststoffen) verwendet. Wie können diese technischen Fortschritte genutzt werden, um die Rezyklatquote zu steigern?

Als Weiterentwicklung kann der Ansatz gelten, die Kunststoffprodukte (Verpackungen können als eigenständige Produkte gesehen werden) mit einer Markierung zu versehen, also nicht primär die immanenten stofflichen Merkmale für die Wertstoffsartierung zu verwenden, sondern eigene technische Spezifikationen, ggf. digitaler Art, für die SuV-Praxis zu etablieren.⁷¹

Es werden im Folgenden vier Auto-ID-Technologien (Barcode, digitale Wasserzeichen, RFID, fluoreszierende Partikel) skizziert [159].

In Holsystemen müssen insbesondere Lösungen gefunden werden, um die Kunststofffraktionen nach den bestmöglichen Recyclingpfaden zu trennen. Hier ist eine material- und verwendungsspezifische Identifizierung des Objekts notwendig, z. B. zur Trennung der faserhaltigen von faserfreien Kunststoffobjekten (z. B. Carbonfasern usw.) oder auch Verpackungen aus dem Food- bzw. Non-Food-Bereich. In manchen Kunststoffen sind auch Stoffe enthalten,

⁷¹ Vorbild ist auch hier das Einweg-Pfand. Die Pfandbehälter werden mit einem Merkmal (Aufdruck, i. d. R. Barcode)) versehen, der dem Lesegerät erlaubt, Pfandbehälter von Nicht-Pfandbehältern zu unterscheiden.

die für bestimmte Rezyklatanwendungen nicht nutzbar sind. Wird eine solche spezifische und qualitativ hochwertige Trennung von verschiedenen Produkttypen in geeigneter Trennschärfe möglich, führt dies zu geeigneten Stoffströmen für ein hochwertiges Recycling. Dies alles gilt nicht nur, aber vor allem auch für Kunststoffverpackungen.

Einschränkend muss gesagt werden, dass der Hersteller zwar die Zusammensetzung der Produkte kontrollieren kann, die Produktveränderungen während der Verwendung jedoch fast immer außerhalb seiner Kontrolle liegen. Dies kann die Zuverlässigkeit der Auto-ID-Informationen einschränken. So könnte beispielsweise eine Lebensmittelflasche im Recyclingprozess identifiziert werden, die während ihrer Nutzungsphase mit einer gefährlichen Chemikalie befüllt wurde.

Vor diesem Hintergrund stellt sich die Frage, welche Auto-ID-Technologie generell am besten geeignet ist, um die Identifikation und Sortierung verschiedener Materialströme in relevante Fraktionen zu ermöglichen [159].

So kann der Einsatz von **Fluoreszenzmarkern** zunächst als vielversprechend angesehen werden. Sie verfügen über ein robustes Identifikationsmerkmal, das verschiedenen Materialien beigelegt werden kann. Die Vielfalt von Unterscheidungskriterien ist – in Grenzen – frei wählbar. Mögliche Unterscheidungskriterien wären: Art des Materials, Eigenschaften, Art der Verwendung oder Hersteller. Vorteil ist die niedrige Markerkonzentration, die für eine zuverlässige Erkennung ausreicht. Die Tracer können auf das Objekt gedruckt, über ein Etikett hinzugefügt oder direkt in das Material des Objekts integriert werden. Hier gibt es viele technische Möglichkeiten.

RFID-Etiketten, z. B. in intelligenten Verpackungen, führen dagegen zu einer Zunahme von Elektroschrott, der schwer zu recyceln ist und aus den sortierten Fraktionen entfernt werden muss. Weiterhin sind sie relativ kostspielig und können bei herkömmlichen Rückgewinnungsprozessen zerstört werden.

Dies kann auch bei aufgeklebten **Barcode-Lösungen** auftreten. Zudem muss der Sichtkontakt zu den Barcode-Scannern bei den SuV-Prozessen gewährleistet werden.

Im Gegensatz dazu scheinen **digitale Wasserzeichen** ein zukunftssträchtiges Anwendungspotenzial zu haben. Werden sie redundant auf der gesamten Ober-

fläche der Verpackung aufgebracht, sind sie robust gegenüber geometrischen Verzerrungen und Verdeckungen. Dennoch ist die Zuverlässigkeit noch nicht nachgewiesen, als technischen Stand z. B. für das am weitesten fortgeschrittene System *Holy Grail 2.0* von *Procter & Gamble*, der *European Brands Association (AIM)* und der *Alliance to End Plastic Waste* ist von TLR 6 auszugehen [160]. Zudem können digitale Wasserzeichen nicht zur Sortierung von vermahlenden Partikeln eingesetzt werden, was mit Fluoreszenzmarkern möglich ist.

Die wichtigsten Eigenschaften der beschriebenen Auto-IDs sind in Tabelle 20 dargestellt, wobei hier die praktischen Einsatzerfahrungen mit Barcodes und RFID's schon berücksichtigt sind.

In die Auto-ID Technologien lassen sich gleichzeitig noch weitere Funktionen integrieren, bspw. können über Barcodes leicht und kostengünstig auch Produktinformationen über das Smartphone zur Verfügung gestellt werden.

Die Produktidentifizierung kann zudem zur Verpackungsidentifizierung genutzt werden, sei es für Pfandsysteme oder zur Sortierung von Altverpackungen. Auch eine negative Aussortierung ist denkbar, beispielsweise über die Markierung von Verpackungen, die Stoffe enthalten haben, die aus verschiedenen Gründen nicht in bestimmte Rezyklate eingehen dürfen.

Die Markierung von Monoverpackungen, also Verpackungen, die nur eine bestimmte Art von Kunststoff enthalten, ist überlegenswert. Für bestimmte Recyclingpfade geeignete Verpackungen erhalten dann passende Marker.

Die Verknüpfung mit anderen Daten kann die Kosteneffizienz steigern. Interessant könnte es z. B. für Vermarkter sein zu wissen, wo welche Verpackungen zum Recycling auftauchen und wo nicht. Weiterhin sollte mit der Datenverknüpfung auch eine produkt- bzw. verpackungsgenaue Recycling- sowie eine Kontrolle der Kosten bis zur Sortierstufe möglich sein.

Eine der einfacheren Fragestellungen wäre bspw., wie hoch das Pfand sein müsste, damit nur ein bestimmter Prozentsatz von Verpackungen in anderen Recyclingsystemen landet.

Bei jeder Art von Markierungssystem muss jedoch bedacht werden, dass die verwendeten Marker nach einem ersten Recyclingdurchlauf unspezifisch in Kunststoffprodukte gelangen können, die nicht der ursprünglichen Anwen-

dung entsprechen. Eine Mischung unterschiedlicher Marker und eine dauerhafte Kontamination sind die Folge. Das bedeutet, dass ggf. ein Bauteil beim nächsten Recyclingdurchlauf falsch erkannt wird, weil zu viel eines Markers in ein nicht markierungswürdiges Bauteil gelangt ist. Inwieweit die Marker die Qualität eines Kunststoffprodukts beeinträchtigen (z. B. Lebensmittelkontakt), müsste ebenfalls noch geprüft werden.

Zu prüfen wäre weiterhin, inwieweit Marker einer herkömmlichen NIR- und optoelektronischen Farbsortierung sowie der Sortierung durch Etikettenmerkmale einen zusätzlichen Nutzen bereiten kann. Denkbar wäre, dass Spezialkunststoffe so aus einem Abfallstoffstrom gezielt erkannt und aussortiert werden könnten (z. B. Copolymer-haltige Werkstoffe oder Kunststoffe mit Gefahrenpotenzial für das Recycling wie Chemikalienflaschen).

Wichtig ist, dass die Systeme gut durchdacht und interoperabel sind. Durch die internationalen Warenströme ist auch eine internationale Abstimmung notwendig. Denkbar ist die Einführung von Normen bzw. Lizenzen für bestimmte Markersysteme, die dann von einem entsprechenden Gremium verwaltet werden, ähnlich derer, die für die Entwicklung und Weiterentwicklung bestimmter Software- und Netzwerkstandards geschaffen wurden (z. B. [161]). Der EAN-Code (Europäische Artikel-Nummer) ist hier erst der Anfang, aber auch eine gute Grundlage. Die geplante Novelle der Ökodesign-Richtlinie der EU sieht einen verbindlichen digitalen Produktpass (DPP) für Inverkehrbringer fast aller Erzeugnisse vor. Der DPP soll bspw. Angaben zu Herkunft, Zusammensetzung, Umweltdaten, Reparatur- und Demontagemöglichkeiten sowie die Handhabung am Ende der Lebenszeit eines Produktes erfassen. Mit dem DPP soll eine zentrale Datenbank mit allen Informationen zum Produkt aufgebaut werden, auf die auch die Verbraucher zugreifen können. Damit kann der DPP die Basis für einheitliche und transparente Produktinformationen werden und zur Förderung einer umweltgerechten Kreislaufwirtschaft beitragen – von der nachhaltigen Rohstoffgewinnung über die Unterstützung bewusster Kaufentscheidungen bei Verbrauchern bis hin zum fachgerechten Recycling von Produkten und Verpackungen.⁷²

72 https://ec.europa.eu/environment/publications/communication-making-sustainable-products-norm_de
(Zugriff 10.05.2022)

	Barcodes	Digital watermarks	RFID	Fluorescent markers
Application of the identification feature				
Positioning	Attached on the object [22]	Attached on the object [10]	Attached on or integrated in the object [14]	Attached on or integrated in the object [60]
Typical application objects	Merchandise, clothes, transportation and distribution goods, medical products [37]	Commercial papers, plastics, packaging, newspaper, displays [45]	Merchandise, card systems, animals, transportation and distribution goods, assets [97]	Plastics, metals, films, coatings, ceramics, adhesives, varnishes, safety documents and prints, paints [60]
External influencing factors	Dirt, moisture, optical cover [15]	Assumably like barcodes	Metals, moisture and liquids [74]	Depending on the color and chemical composition of the marked object [27], [59]
Robustness	Influenced by attachment location and type [78]	Trade-offs between robustness, invisibility and capacity [7]	Robust even in harsh environments [79], lifetime of active tags limited by battery [5]	Robust because of chemical and thermal stability [61]
Read-out of the identification feature				
Contact requirements	Sight contact necessary [66]	Sight contact necessary	No sight contact necessary [21]	Sight contact necessary
Reading speed	Depending on the reader, e. g. laser scanner: 100 scans s ⁻¹ [48]	About 30 % quicker reading speed at Point-of-Sale compared to barcode [90]	> 100 tags s ⁻¹ possible under optimal conditions [78]	Milliseconds [63]
Reading distance	Typically: 0.01–1m [76]	Typically: 0.07–0.2m [45]	Depending on frequency: up to 15m [12]	Typically: up to 0.3m [64]
Reliability	Depending on read distance, geometric distortions, occlusion, print contrast [3], [78]	Depending on occlusion, geometric distortions, print, contrast and lighting conditions [7]	Depending on transponder type, frequency, external interference factors [14]	Depending on marker type, matrix color, excitation radiation density [59]
Security	Low data security, easy copyability [3], [14]	Attacks on robustness and uniqueness possible [57]	Attacks on the coded content, uniqueness, connection between tag and reader possible [12]	Forgery-proof, especially using fluorescent particle patterns [59]

Tab. 20: Übersicht über die Eigenschaften von IDs [159, S. 7 (Onlinefassung)]

Was für die Verbraucherinformationen bspw. bei Lebensmitteln über Apps wie „CodeCheck“ bereits möglich ist, sollte **mittelfristig** auch für die Verpackungen umsetzbar sein. Die genannte Lebensmittel-App kann über bestimmte (aber nicht alle) Barcode-Typen auf der Verpackung die Produktzuordnung auslesen und damit auf Datenbanken zurückgreifen, die produktbezogen die kennzeichnungspflichtigen Inhaltsstoffe erfasst haben. Mit einem digitalen Produktpass für Verpackungen bzw. Rezyklate wären vergleichbare Informationsdienstleistungen für die Kreislaufwirtschaft möglich.

Zu eruieren wäre, inwieweit die Codierung von Kunststoffverpackungen für das Recycling generell ein integraler Bestandteil des *Smart Packaging* sein könnte, so dass alle relevanten Daten für die Wiederverwertung von Verpackungen die vielfältigen mit KI möglichen Produktinformationen ergänzen (z. B. über Logistik-anforderungen; Verfallsdaten; Sensorik für die Einhaltung von TK-Temperaturen, Feuchte und bakteriellen Befall; Gebrauchsanleitungen; Kundendienste wie Reparaturmöglichkeiten; Werbung; bis hin zu aktiven Verpackungen mit Sauerstoffabsorbern, PCM-gestützter Warenklimatisierung etc.).

5.4.2 Verknüpfung von Daten zu Geschäftsmodellen

Obwohl die Verknüpfung von Auto-ID-Daten noch nicht großtechnisch genutzt wird, gibt es Überlegungen für die Überführung in Geschäftsmodelle:

Die *Plattform Deposy* bspw. möchte ein Pfandsystem mit der Kryptowährung IOTA mit Produkt ID's auf Basis der Distributed-Ledger-Technologie (DLT) (siehe z. B. [162]) verknüpfen und so eine umfassende Verfolgung und Kreislaufführung von Verpackungen sicherstellen. Zunächst soll das System in Innenstädten, Schulen, bei Events usw. für Becher u. a. Verpackungen genutzt werden, die Anwendungen könnten aber auch darüber hinausgehen. Es bleibt abzuwarten, wann und in welcher Form sich solche Systeme auf dem Markt etablieren.

Dabei dürfte es keine Rolle spielen, ob nun ein oder ein anderes oder alle Auto-ID-Technologien parallel zum Einsatz kommen, wenn die Daten beispielsweise mit einer Produktdatenbank verbunden werden, die dann auch Verpackungsdaten (Materialien, Komponenten, Trennanleitungen usw.) enthalten, die über

entsprechende Abfragen zur Verfügung stehen. Über die EU müsste dann allerdings durchgesetzt werden, dass die ggf. unterschiedlichen Markersysteme aber wenigstens auf der Ebene der zentralen Datenbank kompatibel sind und auf dieselben Produkt- und Verpackungsinformationen zugreifen können.

Zwischenfazit:

Die Digitalisierung, die eine Nachverfolgbarkeit der Abfälle und damit ihrer Zusammensetzung ermöglichen würde, könnte insbesondere bei der Ausschleusung von Verpackungsabfällen mit hoher Zyklenzahl, gefährlichen Komponenten oder für das Recycling ungeeigneter Kunststoffteile, aber auch zur Gewinnung spezieller Wertstoffe zusätzlich zur Kunststoffsortenerkennung (IR- und Farbsortierung) angewandt werden. Damit wäre u. a. auch eine frühzeitigere Zuordnung zu Recyclingpfaden, wie etwa dem chemischen Recycling oder auch der thermischen Verwertung möglich.

Zu beachten ist, dass die Zusatzstoffe zur Codierung die Produkteigenschaften hinsichtlich einer circularity oder der Anwendbarkeit nicht beeinträchtigen sollten, was vor allem bei chemischen Markern wie den Wasserzeichen der Fall sein könnte [26, S. 111].

5.5 Verbesserung der Qualitäten von Rezyklaten

Zusammenfassend sollen im Folgenden Wege aufgezeigt werden, wie im mechanischen Recycling die Rezyklate mit höherer Reinheit und zyklenfester Materialqualität in großen Mengenanteilen möglichst umweltverträglich hergestellt werden können.

Wie in Tabelle 21 dargestellt, kann die Qualität von Rezyklaten im Wesentlichen innerhalb der drei Prozess-Schritte Sortierung, Verwertung und Rezyklateinsatz verbessert werden, wobei die ökologischen Auswirkungen der einzelnen technischen Ansätze im Hinblick auf Energiebedarf und Wasserverbrauch berücksichtigt werden:

	Maßnahme	Energie- verbrauch	Betriebs- mittel	Wasser- verbrauch	Qua- lität	Aus- beute	Rezyklat- anteil
Sortierung	weitere Detektoren	+	0	0	+	– bis +	+
	Einsatz von Markern	+	0	0	+	+	+
	Sortierung nach Form und Material	+	0	0	+	+	+
Verwertung	Heißwäsche	++	0	0	+	0	+
	Einsatz mehrerer Becken zur Wäsche	0	0	+	+	0	+
	Andere Waschverfahren (energie- und wassersparende Verfahren)	–	0	–	0	0	0
	Einsatz von Tensiden	0	+	0	+	0	+
	Lasersortierung	+	0	0	+	–	+
	Flakesortierung	+	0	0	+	– bis +	+
	Flotation	+	+	+	+	0	+
	Kontaminationen besser einschätzen	0 bis +	0	0	+	+	+
Rezyklat-einsatz	Kompatibilisierung	0 bis +	+	0	+	+	+
	Vermeidung von Verbunden	+	0	0	0	+	0

(++ = stark steigend, + = steigend, 0 = neutral, – = sinkend)

Tab. 21: Maßnahmen zur Rezyklatverbesserung [26, S. 23]

Beim Rezyklateinsatz kann durch die Zugabe von Additiven der Alterungsprozess durch die Nutzungsphase oder die Mehrfachverarbeitung ausgeglichen werden. Wie z. B. die BASF berichtet, wurden neue Additive zur Stabilisierung von Rezyklaten entwickelt [163].

Unbehandelte Rezyklate sind oft weniger stabil gegenüber den thermischen Belastungen der Weiterverarbeitung im Vergleich zu Neuware. Dieses Problem kann durch die Zugabe dieser neuen Stabilisatoren gelöst werden. Das Problem zu geringer Schmelzefestigkeiten von PET-Rezyklaten wird mit Hilfe eines funktionellen Additivs mit dem Handelsnamen *Joncryl ADR* gelöst. Dabei handelt es sich um sogenannte Ketten-Verlängerer (chain extender), also Moleküle, die sich mit den Enden der gebrochenen Polymerketten verbinden.

Eine Verbesserung der Situation beim Recycling könnte sich auch aus der Verbindung der beiden Themengebiete Kunststoffrecycling und additive Fertigung ergeben, s. die erwähnte Eröffnung des Labors für additives Kunststoffrecycling beim *Institut für Integrierte Produktion Hannover (IPH)* zur Erforschung des Recyclings von thermoplastischen Abfällen für die Verarbeitung in 3-D-Druck-Verfahren [146].

Potenziert werden die dargestellten Ergebnisse der Prozessoptimierung im SuV-Betrieb und die neuen technologischen Ansätze durch die vorgelagerten Stufen im Stoffkreislauf – das D4R, die Anteile von Mehr- und Einwegverpackungen am Gesamtabfall sowie das Konzept der Abfallsammlung. Ebenso dürfte eine Verzahnung mit den Recyclingpfaden chemisches Recycling und thermische Verwertung positiv auf die Qualität des SuV-Prozesses zurückwirken, wobei die Wahl der Recyclingpfade zwingend auf einer vergleichenden LCA- und CO₂-Foodprint-, ggf. auch auf einer Kostenbilanz basieren muss:

- Eine politisch durchgesetzte Verteuerung der Abfallverbrennung z. B. über CO₂-Bepreisung dient dann nicht nur einer CO₂-Minderung bei den MVA, sondern wirkt zugleich als Hebel für Investitionen in den SuV-Prozess für mehr und bessere Rezyklate.
- Das chemische Recycling kann der thermischen Verwertung gemäß der Verwertungshierarchie CO₂-belastete Stoffmengen entziehen und zugleich Rohstoffe für neue Kunststoffprodukte in Primärqualität generieren und fossile Rohstoffe substituieren. Es ermöglicht jedoch auch eine Optimierung des mechanischen Recyclings selbst, wenn die prozessbezogene Umweltbilanz ergibt, dass der Verwertungsaufwand für eine Sortierfraktion mit dem chemischen Recycling geringer und zugleich ökologischer ist.

Daraus wird ersichtlich, dass die Qualitätsverbesserung von Rezyklaten mittel- und langfristig nur über eine systemische Herangehensweise gesichert werden kann.

In diesem System ist auch der Verbraucher gefordert. Dies nicht nur bei der Kaufentscheidung für Einweg/Mehrweg- oder Grüner-Punkt-Verpackung oder beim Trennen von Abfällen. Die Verbraucherverantwortung setzt bereits beim D4R an. So könnten Kampagnen von Vorteil sein, in welchen die Verbraucher informiert und überzeugt werden, dass eine umweltverträgliche, weil recyclinggerechte

Verpackung auch Unzulänglichkeiten im Vergleich zum bisher Gewohnten aufweisen kann. Beispielsweise kann der Schritt zurück zu Mono-Verpackungsfolien unter Umständen das Beschlagen einer Verpackung von innen (Fogging) verursachen. Der Verzicht auf High-Tech-Antifogging-Schichten in den Folien verbessert aber unmittelbar die Rezyklatqualität. Ein weiteres Argument für ein recyclinggerechtes Design wird in Abb. 31 deutlich. Hier wurde untersucht, wie sich die Verwendung von verschiedenen Aufkleber-Materialien auf die Rezyklat-Qualität von PC/ABS-Bauteilen auswirkt. Es konnte nachgewiesen werden, dass polymerbasierte Aufkleber aus PP einen geringeren Einfluss auf die Zähigkeits-eigenschaften der Rezyklate haben als die Verunreinigung durch Papieraufkleber.

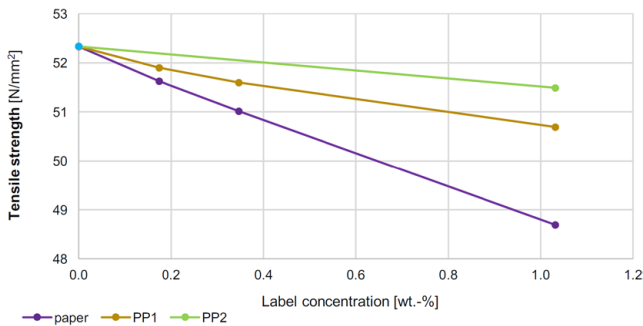


Abb. 31: Einfluss der Konzentration von Aufklebern aus Papier und zwei verschiedenen PP-Folien in Rezyklaten auf die Kerbschlagzähigkeit der Rezyklate [164, S. 49]

5.6 Forschungsprojekte

Hinsichtlich des Recyclings gibt es zahlreiche Forschungsprojekte, die hier nur auszugsweise dargestellt werden können.

Insgesamt 14 Unternehmen und Forschungseinrichtungen aus sechs Ländern beteiligen sich an dem neuen Forschungsvorhaben „CIRCULAR FoodPack“ unter Koordination des *Fraunhofer-Institut für Verfahrenstechnik und Verpackungen (IVV)*. Untersucht wird, wie Verpackungen im geschlossenen Kreislauf leichter und besser recycelt und für den direkten Lebensmittelkontakt eingesetzt werden können [165].

Ein z. Z. bearbeitetes und vom BMBF gefördertes Projekt trägt den Titel „Regionales unternehmerisches Bündnis zum Aufbau von Wertschöpfungsketten für technische Biokunststoffe in Mitteldeutschland (RUBIO)“. Ziel ist die Herstellung von biobasierten und biologisch abbaubaren Biokunststoffen aus Polybutylensuccinat (PBS) mit hoher Variantenvielfalt und deren Verarbeitung zu nachhaltigen Produkten. Weiterhin sollen innovative und nachhaltig erfolgreiche unternehmerische Bündnisse für Biokunststoffe in Mitteldeutschland – über die gesamte Wertschöpfungskette vom Rohstoff zum Recycling – etabliert werden [166].

5.6.1 Werkstoffliches Recycling

FuE-Projekte zur technischen Weiterentwicklung des werkstofflichen Recyclings setzen an verschiedenen neuralgischen Punkten der Prozesskette an, so z. B.:

- Markierungssysteme von Kunststoffen zur Verbesserung der Sortierfähigkeit (siehe Abschnitt 5.4)
- Detektierung und Separierung von Polymerarten mit den Untersortierungen nach Größe, LVP/Hartkunststoffe/Hohlkörper, Verunreinigungen/Fremdstoffe, Farben und Degradationsgraden
- Effektive Trennung von Verbundmaterialien

Ausgewählte aktuelle Projekte werden im Folgenden vorgestellt.

FuE Marker-Systeme:

Das Vorhaben der *Ellen-MacArthur-Foundation* in Großbritannien geht über den Holy-Grail-Ansatz hinaus und führt zwei Marker-Prinzipien zusammen, chemische Tracer und digitale Wasserzeichen, und verknüpft sie mit herkömmlichen Sensorsystemen (NIR + optoelektronisch) zur Detektierung der Einzelabfälle nach Form, Dichte, IR-Spektrum und Farbe. Zusätzlich greift das System auf eine umfangreiche Datenbank zu, die dem Sortiersystem Informationen zu jedem Kunststoffteil liefert, um eine zielgenaue Sortierung nach definierten Kriterien zu veranlassen, z. B. lebensmitteltauglich vs. nicht lebensmitteltauglich. Die Informationen können ständig aktualisiert und erweitert werden, um z. B. eine Änderung der Sortierpräferenzen zu ermöglichen, wenn sich die Recyclingfähigkeit eines Artikels verbessert [167]. Der Hauptunterschied zur

bisherigen Markersystemen besteht u. a. darin, wie die Codes in den Kunststoff eingebracht werden und wie weit das Einsatzspektrum geht:

- Ein chemischer Tracer ist ein Molekül, das in den Kunststoff oder in eine Verpackungskomponente wie ein Etikett eingebettet ist und als binärer „Code“ fungiert, da die Chemikalie entweder vorhanden ist oder nicht. Das Molekül ist aufgrund seiner spektroskopischen Eigenschaften (z. B. Fluoreszenz unter UV-Licht) nachweisbar. Im Prinzip ist es möglich, mehrere verschiedene Tracermoleküle mit jeweils einzigartigen Spektren zu kombinieren, um die Zahl der möglichen Codes zu erhöhen. Mit solchen Tracern markierte Verpackungen können mit UV-Sortieranlagen identifiziert und sortiert werden. Der chemisch markierte Artikel ist unempfindlich gegenüber Verformungen oder anderen physikalischen Belastungen, solange der Tracer an der Materialoberfläche UV-Strahlen reflektieren kann. Ein weiterer Vorteil gegenüber allen anderen Markersystemen ist, dass Tracer prinzipiell auch kleinteiliges Schreddermaterial detektieren können.
- Ein digitales Wasserzeichen ist ein optischer Code in der Größe einer Briefmarke, der direkt als Etikett auf den Artikel aufgebracht oder in die Form eingeprägt wird, in der Regel in Form von mehreren Kacheln. Der Code wird durch subtile Modulation der Pixel, aus denen sich das Design zusammensetzt, oder durch Hinzufügen von mikrotopologischen Variationen auf der Kunststoffoberfläche als Textur erzeugt. Dafür sind keine zusätzlichen Materialien erforderlich. Neben der Erkennung durch eine zusätzliche Kamera in einer Sortieranlage können digitale Wasserzeichen auch von Barcode-Scannern und Smartphones erkannt werden, wodurch die gekennzeichneten Gegenstände praktisch zu Verbraucher- und Verwerter-tauglichen Internet-of-Things-Objekten werden. Die Codes können eine Vielzahl von Attributen enthalten, z. B. Hersteller, Art des verwendeten Kunststoffs und Zusammensetzung bei mehrschichtigen Gegenständen, Verwendung für Food- oder Non-food-Anwendungen usw. Die Anzahl der verfügbaren Codes ist praktisch unbegrenzt, die Attribute können im Laufe der Zeit hinzugefügt und falsch-positive Einträge eliminiert werden.
- Chemische Tracer und digitale Wasserzeichen ermöglichen in Kombination eine Sortierung mit wesentlich höherer Granularität und Qualität. Das System lässt sich an bestehenden Sortieranlagen nachrüsten. Die maschinenlesbaren Codes könnten entlang der gesamten Wertschöpfungskette bis hin

zur Kaufabwicklung der finalen Produkte genutzt werden [98]. (Da bei der Umsetzung des kombinierten Systems die Kunststoffproduzenten, die Verpackungshersteller, der Anlagenbau und die SuV-Betriebe mit einer Technologieumstellung auch ihre jeweiligen Investitionskosten hätten, kann beim gegenwärtigen Entwicklungsstadium eine wirtschaftliche Bewertung – ökologischer Benefit vs. Mehrkosten – noch nicht vorgenommen werden.) [98]

Das innovative Institut realisiert parallel weitere Projekte wie *Lodestar* (Kombination von mechanischem und chemischem Recycling in einer Anlage), *Proof* (Prototyping von Verpackungslösungen auf Kunststoffbasis für ein hochwertiges Recycling) oder *Barrier* (Zusammenfassung aller Akteure der gesamten Kunststoff-Wertschöpfungskette zur Erstellung einer recyclingorientierten Design-Richtlinie) [167].

In Freiburg wurde 2021 eine Demonstrator-Anlage zum „Markerbasierten Sortier- und Recyclingsystem für Kunststoffverpackungen“ in Betrieb genommen. Die sogen. Tracer-Based-Sorting-Technologie basiert auf fluoreszierenden Markerpartikeln, die nur bei speziell definierter Anregung im Infrarotbereich sichtbar werden. In der Sortierung können dann mit einer speziell auf die Marker abgestimmten Sortieranlage die markierten Artikel aus dem Abfallstrom identifiziert und abgetrennt werden [168].

Forschungslücke FuE: Trennung Verbundmaterialien

Für die Trennung von Multilayern und weiteren Verbundmaterialien gibt es bislang wenig technische Lösungen auf TLR 9-Niveau, insbesondere bei mit Metall oder Zweitkunststoffen beschichteten Folien. Bekannt ist die Schweizer *Wiederkehr AG* mit einer zentrifugengestützten mechanischen Verbundstofftrennung mit der Zielfraktion Buntmetalle [169]. Die abgetrennten Kunststoffe sind nach der Behandlung jedoch stark schadstoffbehaftet und können so nur thermisch verwertet werden. Bei kryogenen Verfahren unter Verwendung von flüssigem Stickstoff, wie sie sich bereits beim Recycling von Elastomeren, Reifen u.ä. Produkten bewährt haben [170], [171], verspröden viele Kunststoffe. Es gibt einzelne Anwendungen [172], für PCA sind jedoch keine bekannt, zumal das Verfahrensprinzip sehr energieaufwändig ist. Aktuell existiert nur das lösemittelbasierte Verfahren wie z. B. der Newcyclingprozess der Merseburger *APK AG* [86]. Das Verfahren ist jedoch auf PO-Kunststoffe beschränkt, vom Ansatz her aber auch für Styropor geeignet. In dem Freiburger Unterneh-

men *Pyral* arbeitet seit 15 Jahren eine Pyrolyse-Anlage, die aluminiumhaltige Kunststoffverbundmaterialien behandelt. Zielprodukt ist das Aluminium, die Pyrolyse gasen werden in einem BHKW nur zur energetischen Sicherstellung des Prozesses eingesetzt [173]⁷³. Theoretisch wäre auch ein chemisches Recycling der Kunststoffanteile möglich. Das Beispiel zeigt zumindest das praktische Potenzial dieses Recyclingpfades auch für die Verbundstofftrennung.

5.6.2 Verbesserung der Rezyklatqualität

Die zahlreichen Bestrebungen im Bereich der Verbesserung der Rezyklatqualität durch Additivierung lassen darauf schließen, dass Wissenschaft und Technik hier ein großes Entwicklungspotenzial sieht. Beispielsweise entwickeln im Forschungscluster *Circular Plastics Economy CCPE*[®] [174] über Branchengrenzen hinweg fünf Institute der Fraunhofer-Gesellschaft gemeinsam mit ihren Stakeholdern Systemleistungen für eine funktionierende zirkuläre Kunststoffwirtschaft. Wobei das *Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF* in Darmstadt in diesem Konsortium die Forschungen zur Qualitätssteigerung von Rezyklaten mit Additiven übernommen hat. Die molekularen Alterungsprozesse während der Anwendung, durch Auswirkungen von Verunreinigungen und Rückständen von Kontaktmedien sollen durch die Zugabe geeigneter Additive ausgeglichen werden [175].

**Eigenschaften des neuen Rezyklat-Stabilisatorsystems:
Mehrfachextrusion von Post-Consumer PP-Rezyklat**

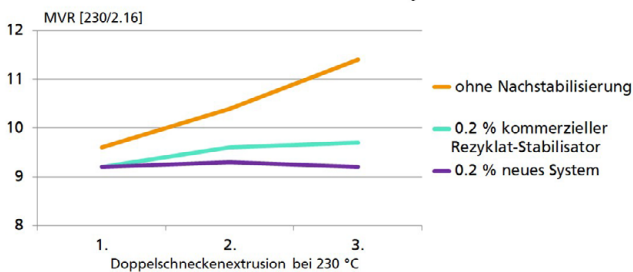


Abb. 32: Neues Stabilisatorsystem übertrifft Neuware und kommerzielle Rezyklatstabilisatoren [176]

⁷³ Ein gern gesehenes Abfallprodukt sind hier z. B. verbrauchte Kaffeekapseln aus Aluminium. Der Kaffeesatz eignet sich sehr gut für die pyrolytische Umsetzung und erhöht die energetische Ausbeute im Prozess.

Erste erfolgversprechende Ergebnisse liegen bereits vor (siehe Abb. 32, Abb. 33). Die mit dem neuen System stabilisierten Post-Consumer PP-Rezyklate zeigten auch nach dreifacher Verarbeitung im Doppelschneckenextruder kein Abbauverhalten der Polymerketten, was sich in einem Anstieg im Schmelzindex (hier MVR) bei den kommerziell stabilisierten und ohne Nachstabilisator verarbeiteten Serien zeigte.

Ein weiteres Forschungsprojekt im Rahmen des oben erwähnten Forschungsclusters *Circular Plastics Economy CCPE*[®] zielt auf eine neue Generation von Stabilisatoren für Polyolefin-Rezyklate ab, die in Kooperation mit der Firma Brüggemann entwickelt werden [175].

**Eigenschaften des neuen Rezyklat-Stabilisatorsystems:
Langzeit-Stabilisierung von Post-Consumer PP-Rezyklat**

Ofenalterung bei 150 °C

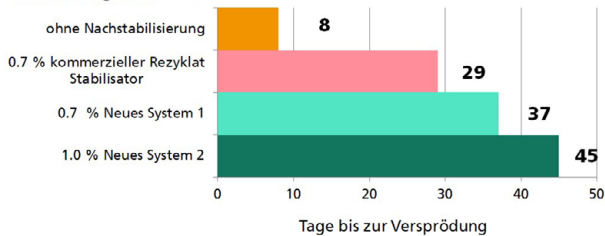


Abb. 33: Neues Stabilisatorsystem bietet exzellente Langzeit-Thermostabilität von Rezyklaten [176]

In einem an der HS Merseburg erarbeiten Projektantrag zum Thema „Nachhaltige Kunststoffkreislaufwirtschaft im mitteldeutschen Chemiedreieck“ werden verschiedenen Forschungsansätze zur Verbesserung der Rezyklatqualität verfolgt:

- „RecyclingSandwich“ – Neuartige Design-For-Recycling-Konzepte für thermoplastische Sandwich-Bauteile
- Chemisches Recycling für End-of-Life-Kunststoffe
- Neuartige Anwendungen für Gummi-Rezyklate

Die Ziele dieser drei Forschungsvorhaben stehen stellvertretend für die vorhandenen Forschungs- und Entwicklungspotenziale, die sich derzeit hauptsächlich

in den drei Bereichen „Design for Recycling“, „Chemisches Recycling“ und „Elastomer-Recycling“ als Grundlage für die Verbesserung der Qualität von Rezyklaten entwickeln.

5.6.3 Chemisches Recycling

Hinsichtlich des chemischen Recyclings gibt es vielfältige Forschungsaktivitäten, die privat, aber auch öffentlich gefördert realisiert werden. Eine Auswahl ist unten aufgelistet. Stoßrichtung ist im Besonderen die technische Umsetzung und Etablierung einer Circular Economy für die Hersteller von Kunststoffen.

- Eine umfangreiche Veröffentlichung zeigt den Stand der Technik und Weiterentwicklungsmöglichkeiten auf [177, S. 69].
- Mit der aktuellen Fördermaßnahme „Ressourceneffiziente Kreislaufwirtschaft – Kunststoffrecyclingtechnologien (KuRT)“ will das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) die Entwicklung einer ressourceneffizienten Kreislaufwirtschaft in Deutschland weiter vorantreiben und die hochwertige Kreislaufführung von Kunststoffen ausbauen. Aktuelle Forschungsthemen sind u. a.:
 - ▷ Weiterentwicklung innovativer, marktfähiger Verfahren zum chemischen bzw. rohstofflichen Recycling zur Bereitstellung von Ausgangsstoffen für die Chemieindustrie
 - ▷ Weiterentwicklung von werkstofflichen und rohstofflichen Verfahren bezüglich Qualität und Reinheit der Rezyklate, Qualitätssicherung, Flexibilität und Wirtschaftlichkeit der Verfahren
 - ▷ Innovative Sortierlösungen für Kunststoffabfälle und weitere Ansätze zur Erhöhung der Nutzungseffizienz
 - ▷ Konzepte, Technologien und industrielle Demonstration für das gemeinsame Recycling von Kunststoffen und werthaltigen anorganischen Additiven
 - ▷ Neue Ansätze zur Förderung der Nachfrage nach bzw. des Einsatzes von Post-Consumer-Kunststoffrezyklaten
 - ▷ Design-for-Sustainability-Konzept

In der Vergangenheit wurden bereits Aktivitäten über FONA gefördert: [178]

- ResolVe, das Projekt zum Recycling von Polystyrol (PS) ist abgeschlossen.
- RevolPET, das Projekt zeigt Wege zur Solvolyse und Verwertung von PET-Abfällen auf [179].

Hinsichtlich Vergasung gemischter Kunststoffabfälle koordiniert die TU Darmstadt das vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) geförderte Forschungsprojekt „Verena“ für chemisches Recycling [180].

Fraunhofer listet in einem Positionspapier seine umfangreichen Forschungskompetenzen im mechanischen als auch im chemischen Recycling von Kunststoffabfällen auf. Es enthält im Bereich des chemischen Recyclings die Pyrolyse, katalytische Spaltung, Vergasung und Solvolyse [181].

Beim CEFIC [182] werden industrielle Aktivitäten namhafter Firmen aufgelistet, u. a.:

- Arkema (PMMA-Recycling): MMAtwo-Projekt (Start Oktober 2018), das mit 6,6 Mio. € aus dem Forschungs- und Innovationsprogramm Horizont2020 der Europäischen Union gefördert wird [183].
- BASF (Verpackungsabfälle), kündigte 2018 sein ChemCycling-Projekt an, das darauf abzielt, recycelte Rohstoffe aus Kunststoffabfällen in seinem Produktionsverbund zu verarbeiten (Investition von 20 Mio. € in das Unternehmen *Quantafuel*, einem Spezialisten für die Pyrolyse von gemischten Kunststoffabfällen und die Reinigung von Pyrolyseöl) [184].
- *BP Infinia* (PET) ist eine verbesserte Recyclingtechnologie, die darauf abzielt, undurchsichtige und schwer zu recycelnde PET-Kunststoffabfälle in recycelbare Rohstoffe umzuwandeln, die zur Herstellung neuer, hochwertiger PET-Kunststoffverpackungen verwendet werden können, und zwar ohne Qualitätsverlust [185].
- *Covestro* (Polyurethane – Matratzenschaumstoff) ist Partner eines Forschungskonsortiums unter den Label *PUReSmart*, das 2019 seine Arbeit aufgenommen hat und Möglichkeiten zur Verbesserung des Recyclings von Polyurethan-Kunststoffen und zur Entwicklung eines zirkulären Produktkreislaufs für diese Materialien erforscht [186].
- INEOS *Styrolution* (Polystyrol) arbeitet auch mit *Agilyx* zusammen. Gemeinsam mit *Trinseo* planen sie eine Recyclinganlage unter dem Dach von

SCS in Europa, Link (Juli 2019); in den USA plant *Styrolution* eine Recyclinganlage mit *Agilyx* in Channahon, Illinois [187].

- *LyondellBasell* (u. a. Verpackungsabfälle) kündigte die Zusammenarbeit mit dem *Karlsruher Institut für Technologie (KIT)* und *Remondis* an, um das chemische Recycling von Kunststoffen voranzutreiben und die globalen Bemühungen um die Kreislaufwirtschaft und das Recycling von Kunststoffabfällen zu unterstützen [188].
- *Total* (Verpackungsabfälle) hat sich mit *Citéo*, *Recycling Technologies*, *Nestlé* und *Mars* zu einem Konsortium zusammengeschlossen, das Akteure der gesamten Wertschöpfungskette für das Recycling von Kunststoffverpackungen zusammenführt, um die technische und wirtschaftliche Machbarkeit des Recyclings komplexer Kunststoffabfälle zu untersuchen, die derzeit als nicht wiederverwertbar gelten und daher entweder verbrannt oder auf Deponien entsorgt werden. Dieses Projekt soll dazu beitragen, das Ziel von *Total* zu erreichen, bis 2030 mindestens 30 % seiner Polymere über Recycling herzustellen [189].
- Die *Northwestern University* (PET) in Illinois entwickelt eine lösemittelfreie katalytische Methode zur Zerlegung von PET in seinen chemischen Grundbaustein Terephthalsäure. Benötigt werden dafür ein MOF-Katalysator sowie Wasserstoff [190].

5.7 Kunststoffrecycling von Biopolymeren

Die Begriffe Biokunststoff oder Biopolymer sind im Zusammenhang mit nachhaltigen Verpackungswerkstoffen in aller Munde. Wie in Abb. 34 dargestellt ist die Definition der Biopolymere recht komplex und auch das Problem der Umweltverschmutzung durch Verpackungswerkstoffe kann durch die Verwendung von Biopolymeren nicht gelöst werden.

Ihren Namen erhalten die Biokunststoffe, wenn sie entweder biologisch abbaubar sind und/oder aus nachwachsenden Rohstoffen hergestellt wurden. Wie in Abb. 34 dargestellt, ergeben sich aus diesen beiden Bedingungen drei verschiedene Szenarien für die Eigenschaften. Es können nach dieser Definition also auch aus petrochemischen Rohstoffen hergestellte Polymere, die biologisch abbaubar sind, als Biopolymere bezeichnet werden.

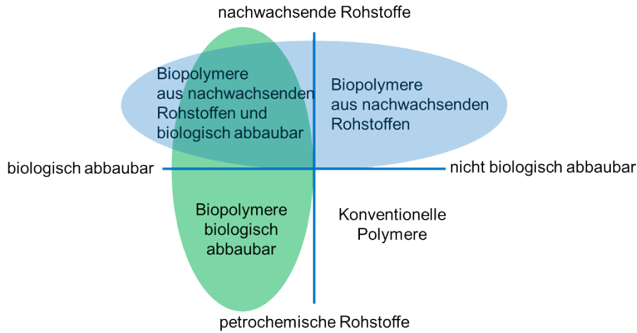


Abb. 34: Bio-Polymerwerkstoffe auf der Basis nachwachsender Rohstoffe oder biologisch abbaubar gemäß EN 13432 [191]

Neben diesen unscharfen Begrifflichkeiten suggeriert der Begriff biologische Abbaubarkeit oft die Vorstellung, dass ein solches Polymer, den normalen klimatischen Verhältnissen ausgesetzt, sich zu solch guten Abfallprodukten wie dem Humus verwandelt, analog einer Kartoffelschale auf dem Komposthaufen. In einigen Regionen des Ozeans sind die Bedingungen für den biologischen Abbau jedoch so schlecht, dass sogar organisches Material wie Fische oder Algen ihre Spuren im Fossilienbestand hinterlassen können [192]. Biokunststoffe sind also auch nicht die zukünftige Lösung, um die Verschmutzung der Weltmeere einzudämmen. Im Gegenteil, die vermeintliche Abbaubarkeit verleitet den Anwender von als biologisch abbaubar beworbenen Kunststoffprodukten womöglich noch stärker dazu, Verpackungen in die Umwelt zu entsorgen.

Bei den zertifizierten biologisch abbaubaren Biopolymeren findet der Prozess des Abbaus in industriellen Kompostieranlagen unter definierten Bedingungen statt: Für den biologischen Abbau benötigt das Biopolymer Polymilchsäure (PLA) beispielsweise industrielle Kompostierungsbedingungen, einschließlich Temperaturen über 136 Grad Fahrenheit (57,7°C). Unter den richtigen Umständen können Mikroben das Material innerhalb weniger Wochen in Kohlendioxid und Wasser umwandeln. Wenn es jedoch verschmutzt ist oder unsachgemäß entsorgt wird, bleibt PLA viel länger erhalten. Wenn reines PLA ins Meerwasser gelangt, scheint es überhaupt nicht biologisch abgebaut zu werden. Für Frederik Wurm, Chemiker am *Max-Planck-Institut für Polymer-*

forschung (MPIP), sind Trinkhalme aus PLA „das perfekte Beispiel für Greenwashing“. Sie sind teurer als andere Trinkhalme aus Plastik, werden aber am Strand oder im Meer nicht ohne weiteres biologisch umgesetzt [192].

Weiterhin sind die Stabilität und das Einsatzverhalten von Biopolymeren aus nachwachsenden Rohstoffen, die biologisch abbaubar sind, oft so unzureichend, dass sie häufig mit konventionellen Polymeren compoundiert werden müssen. Im Sinne eines möglichst sortenreinen Recyclings ist dies kontraproduktiv.

„Ein Bambus-Kunststoffbecher ist meist nicht mal so nachhaltig wie ein reiner Kunststoffbecher. Denn diesen Kunststoff kann ich am Ende wieder recyceln, weil er sortenrein ist. Bei den Mischungen aus Bambus, Maisstärke und Melamin geht das nicht. Die können nur verbrannt werden“, wird Uwe Lauber vom *Chemischen und Veterinäruntersuchungsamt* in Stuttgart zitiert [193]. Zusätzlich zu den Schwierigkeiten und Hemmnissen des konventionellen Recyclings weisen die Biopolymere das Problem der niedrigen thermischen Stabilität auf. Eine mehrfache Verarbeitung ist hier auch bei sortenreiner Trennung schwer möglich. Wobei sich in der Literatur auch Ansätze finden lassen, die ein konventionelles Recycling für Biopolymere für realisierbar ansehen (siehe Abb. 35).

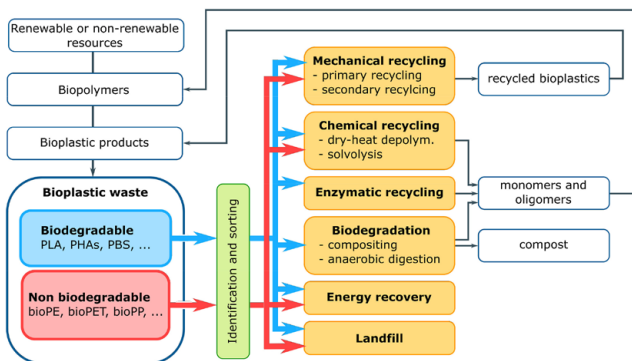


Abb. 35: End-of-Life-Routen für biologisch abbaubare und nicht biologisch abbaubare Biokunststoffabfälle [194]

Die für ein konventionelles mechanisches Recycling gesetzlich vorgeschriebenen Recycling-Codes (siehe Abschnitt 4.1.1) wurden zwischenzeitlich auch für Biopolymere entwickelt (siehe Abb. 36)

"OK biobased" polymer (TÜV; ex Vinçotte), CEN/TS 16137 and ASTM 6866	
"DIN Geprüft biobased" polymer (DIN CERTCO), ASTM 6866, CEN/TS 16137	
"USDA Certified Biobased Product" (United States Department of Agriculture, USDA), ASTM 6866	
"biobased" carbon content of a product (Netherlands Standardization Institute, NEN), EN 16785-1	
"BiomassPla" mark for products made from bio-based plastics authorized by the Japan BioPlastics Association (JBPA)	
Cereplast's symbol for identifying packaging products made of biopolymers	

Abb. 36: Etiketten für biobasierte Polymere [195]

Alternative Ansätze zum mechanischen und chemischen Recycling von petrochemisch (erdölbasiert) hergestellten Polymeren können unter dem Begriff **biologisches Recycling** zusammengefasst werden [196], [197]:

Der geschlossene Stoffkreislauf von herkömmlichen, erdölbasierten Polymeren kann lediglich auf die Biopolymere übertragen werden, die **nicht** biologisch abbaubar sind, da eine ausschließliche Mehrfachverarbeitung von biologisch abbaubaren Kunststoffen nicht vorgesehen ist. Bei biologisch abbaubaren Polymeren dagegen kann der im Abb. 37 dargestellte Stoffkreislauf realisiert werden. Nach dem Teilschritt „Werkstoffliches Recycling“ findet der Prozess der Kompostierung und die Umwandlung in Energie, CO₂, Wasser und Biomasse statt.

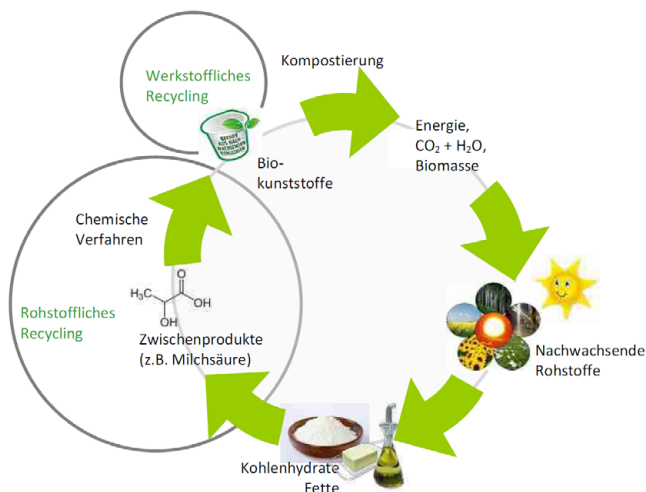


Abb. 37: Stoffkreislauf mit biologisch abbaubaren Produkten auf Basis nachwachsender Rohstoffe [198, S. 6]

Das heißt, nach der Nutzungsphase schließt sich ein Kompostierungsprozess an, der wiederum Energie und CO_2 für neue nachwachsende Rohstoffe liefern kann.

Ein Entwicklungstrend des biologischen Recyclings ist die Suche nach oder die gentechnische Entwicklung von Mikroorganismen, die in der Lage sind, die Makromoleküle der Polymerwerkstoffe in ihre Grundbestandteile, die Wiederholeinheiten (umgangssprachlich auch als Monomere bezeichnet) zu zerlegen. Damit könnte eine enzymatische Zersetzung in die chemischen Bausteine des Kunststoffs (möglicherweise auch von bisher noch nicht biologisch abbaubaren Kunststoffen) erfolgen. Aus diesen hergestelltes Rezyklat ist chemisch und physikalisch von neuem Kunststoff nicht zu unterscheiden. Ein erster Erfolg in dieser Richtung ist ein Bakterium mit dem vorläufigen Namen *Ideonella sakaiensis*, das PET abbaut. Eine japanische Arbeitsgruppe unter der Leitung von Kohai Oda vom *Kyoto Institute of Technology* untersuchte dazu 250 mit PET-Resten kontaminierte Umweltproben – in einer davon, Nummer 46, wurde das japanische Team fündig: Dort lebte tatsächlich eine Bakteriengemeinschaft, die Löcher in den Kunststoff frisst – und Ideonella produziert die beiden Enzyme, die PET in seine ungefährlichen Bestandteile zerlegen [197].

Es wird sogar vorgeschlagen, herkömmlichen, nicht abbaubaren Kunststoff durch biologisch abbaubare Biopolymere zu ersetzen und dann sämtliche Kunststoffabfälle in mikrobiellen Zellfabriken zur recyceln [196]. Die durch biologisches Recycling gewonnenen zersetzten Fragmente oder depolymerisierten Monomere sollten später als Substrate oder alternative Kohlenstoffquellen verwendet werden.

6 Beschreibung möglicher Zielsetzungen

6.1 Zusammenfassung Ergebnisse

Die wichtigsten oben beschriebenen Probleme und Hemmnisse werden in der folgenden Tabelle zusammengefasst.

Glied im Kreislauf	Mengen	Qualität	Aufwand	Hemmnisse
Kunststoff-sammlung	Große Mengen werden in Deutschland über verschiedene Sammelsysteme erfasst	Gemische Ausnahmen: - PET-Flaschen - PVC-Fenster	Holsysteme: geringerer logistischer Aufwand, Bringsysteme: höherer logistischer Aufwand	Verunreinigungen und Fehlwürfe, Mischungen Ausnahmen: - PET-Flaschen - PVC-Fenster
Kunststoff-abfallaufbereitung und -sortierung	Kapazität zur Verarbeitung der Gesamtmengen vorhanden	Nur grobe Sortierung Mischverpackungen, Problem: Verunreinigungen kommen in die Rezyklate (< 5 % Fremdkunststoff gilt als Mono-rezyklat) Ausnahmen: - PET-Flaschen - PVC-Fenster	Holsysteme, Sortierung und Aufbereitung aufwendiger. Sortierung ausbaubar (z. B. nach Farben) Bringsysteme: Sortierung kaum notwendig, Aufbereitung nur geringer Aufwand.	Sortiertechnik nicht auf dem Stand der Technik. Investitionen in Sortiertechnik haben kein ausreichendes Gewinn-Risiko-Verhältnis Techn. Grenze: Abnahme der Qualität durch Mehrfachverarbeitung Nicht alle Fraktionen für Recycling nutzbar
Recycling-technologien für Mahlgut, Agglomerate, Regranulate, chem. Grundstoffe und energetische Verwertung	Viele Sortierfraktionen werden noch exportiert; prinzipiell könnte die Herstellung von Rezyklaten ausgeweitet werden, sofern ein Inlandsmarkt existiert	Besondere Eigenschaften häufig nicht erreichbar; saubere/ sortenreine Vorprodukte Problem: Zulassung für Lebensmittelkontakt! Ausnahmen: - PET-Flaschen	Hoher Aufwand; aber geringer als die Herstellung von Neumaterial durch Preis/Regularien kompensierbar	Generell hohe Investitionsrisiko durch Marktrisiken im Rezyklat- und Rohstoffmarkt. (Preise, Mengen, gesetzliche Rahmenbedingungen) Chem. Recycling im VerpackG nicht anerkannt

Rezyklatmarkt	Abnahme von großen Mengen möglich, wenn in ausreichenden Qualitäten geliefert werden kann.	Die Qualität der Rezyklate (PCR) ist im Durchschnitt zu niedrig. Das gesetzliche Anforderungsprofil ist oft zu hoch, insbesondere bei Post Industrial Rezyklaten für die Anwendung im Food-Bereich.	Die Verwendung von Rezyklaten hat häufig einen Vermarktungsvorteil. Der Preisvorteil hängt von den Rohstoffpreisen und der Verfügbarkeit von hochwertigen Rezyklaten ab und ist aber etwas weniger volatil als der Preis für Neuware.	z. T. sehr hohe Anforderungen; nicht für Lebensmittelkontakt/ Kosmetik zugelassen Gesetzliche Rahmenbedingungen u. schwierige Zulassungsverfahren Beispiele: PIR werden häufig nicht für hohe Anforderungen anerkannt ⁷⁴ PCR für Lebensmittelbereich nicht anerkannt. (Generell bei Holzsystemen, teilweise bei Bringsystemen, z. B. bottle-to-bottle.)
Handel/ In-Verkehr-bringer	Großer Bedarf, da die Verwendung von Rezyklaten ein positives Image hat.	Die angebotenen Mengen sind häufig zu gering, insbesondere bei hohen Qualitäten.	Zulassungsaufwand ist hoch!	zu geringes Angebot

Tab. 22: Zusammenfassung ausgewählter Ergebnisse (Quelle: eigene Darstellung)

6.2 Zielkonflikte

Wie aus Tabelle 22 hervorgeht, besteht ein grundsätzliches Interesse der Hersteller bzw. der Inverkehrbringer Rezyklate zu verwenden. Größtes Hemmnis ist die unzureichende Qualität der Rezyklate in ausreichenden Mengen. An Verbesserungen wird zwar gearbeitet (siehe Abschnitt 5.6), doch die Nachfrage kann vor allem im Verpackungsbereich mit Lebensmittelzulassung mittelfristig kaum befriedigt werden. Um die Hemmnisse abbauen zu können, müssen zunächst die immanenten, aber häufig kaum sichtbaren Zielkonflikte verstanden werden. Dazu muss man die Anforderungen an Produkte, wie z. B. Verpackungen, und die Interessenkonstellation bei den beteiligten Stakeholdern verstehen.

⁷⁴ Siehe z. B. Prozentangaben für Recyclingquoten und mögliche Gründe [199].

Die Anforderungen an die in Verkehr gebrachten Produkte können dabei sehr unterschiedlich sein und betreffen im Allgemeinen primär Funktionalität, Preisfaktoren wie z. B. Materialauswahl inklusive Füllstoffe, Additive zur leichteren Verarbeitbarkeit zur Senkung der Kosten, Marketingaspekte wie das Design (u. a. Farbwahl), Umweltaspekte und sonstige Funktionen. Eine sorgfältige Abwägung des Produktdesigns ist firmen- und/oder produktspezifisch und versucht den Marktanforderungen zu entsprechen. Aufgrund der breiten Wahl der Einsatzstoffe, um die Anforderungen zu erfüllen, ist die Zusammensetzung der Rezyklate häufig sehr vielfältig oder es muss ein entsprechend aufwändiger Trennprozess, soweit dieser überhaupt realisierbar und sinnvoll ist, erfolgen.

Eine Einschränkung in der Auswahl von Komponenten von Kunststoffprodukten könnte diesen Trennaufwand reduzieren. Das erscheint möglich, da ein und dieselbe unabdingbare Funktion auf unterschiedlichem Weg auf Kosten sekundärer Funktionen erreicht werden kann (siehe Abschnitt 4.4.1 am Beispiel von Verpackungen z. B. Abb. 20 auf S. 122).

Man kann also akzeptable Einbußen in der Funktionalität und/oder der Unternehmens-DNA zugunsten einer systemischen Materialeinschränkung erreichen. Firmen- und produktspezifisch wird das bereits teilweise umgesetzt und anhand von LCAs bewertet. Eine systemische Betrachtung wäre hier jedoch ein weiterer Fortschritt, weil nicht die prinzipielle Recyclingfähigkeit, sondern das spezielle Design for Circularity im Gesamtsystem, d. h. auch unter Berücksichtigung ökobilanzieller, rechtlicher und wirtschaftlicher Rahmenbedingungen, betrachtet werden müsste.

Allgemeine Zielkonflikte bei der Kreislaufwirtschaft von Verpackungsmaterialien

Hinsichtlich des Kreislaufprozesses zur Wiederverwertung von Verpackungsmaterialien aus Kunststoff allgemein (gelbe Tonne etc.) erweitert sich der Zielkonflikt Funktionalität vs. Recyclingfähigkeit, weil die Interessen aller Akteure (Handel, Verbraucher, SuV-Unternehmen, MVA-Betreiber, Verwender von Rezyklaten, Gesellschaft) berücksichtigt werden müssen [19]. Diese Betrachtung führt sofort zu dem **allgemeinen, das gesamte Kunststoffrecycling übergreifenden Zielkonflikt**, der aus dem traditionell gewachsenen, mengenorientierten

unternehmerischen Handeln der Akteure einerseits und dem Gebot der Abfallvermeidung, dem Primat der Verwertungshierarchie andererseits resultiert: Die Verpackungsindustrie, die SuV-Unternehmen, die Rezyklathersteller, die dualen Systeme, die MVA – alle haben in der aktuellen Struktur der Recyclingwirtschaft das Interesse, soviel Verpackungen wie möglich in Verkehr zu bringen, zu transportieren bzw. zu sammeln, aufzubereiten, so viel Rezyklat wie möglich herzustellen bzw. soviel wie möglich an Reststoffen thermisch zu verwerten. Je größer die Mengen umso höher (tendenziell) der Umsatz und die Gewinnerwartung auf den genannten Stufen des Stoffkreislaufes. Aus dieser Sicht gibt es für die Akteure zunächst keinen Anreiz, den Anteil von Verpackungen im Verhältnis zur verpackten Produktmasse zu reduzieren. Einzig der Handel und die Verbraucher könnten an eingesparten Materialien und Kosten für Verpackungen partizipieren (wenn man beim Handel vom erwähnten Geschäft mit dem Pfandschlupf und dem Verkauf von hochwertiger PET-Ballenware, s. Pkt. 4.4.3, absieht). Dagegen stehen zugleich Nutzenabwägungen seitens Verbraucher und Handel im Hinblick auf die Funktionen von Verpackungen.

Handel

Der Handel ist in der Regel der Treiber für die Definition der Funktionalität jeder Verpackung. Die Primärfunktion steht im Vordergrund. Die Ware soll also geschützt werden und bei verderblichen Produkten eine Haltbarkeit gewährleisten, die den Logistik- und Marketinginteressen entspricht. Lange Haltbarkeit hat hier den Vorteil, dass Waren günstiger eingekauft und disponiert werden können.

Sekundär- und Tertiärfunktionen (Verkaufsfunktion, Werbefunktion, Dienstleistungsfunktion, Garantiefunktion) sind häufig durch die Wahl ansprechender Material-, Formen- und Farbwahl auf unterschiedlichste Weise realisiert.

Was über aller Funktionalität steht, ist jedoch die Wirtschaftlichkeit.

Verbraucher

Der Verbraucher hat in der Regel kein Interesse an der Verpackung selbst. Im Vordergrund stehen meistens lediglich die Primärfunktionen Produktschutz und Information. Nach dem Gebrauch der Ware ist die Verpackung wertlos

und sollte so einfach wie möglich verschwinden. Pfand- und sonstige Sammelsysteme von Verpackungen bieten eine kleine monetäre Rückerstattung und appellieren an das Umweltbewusstsein.

Das Sammeln von Pfandverpackungen und je nach Region von pfandfreien Verpackungen führt im Haushalt zu einem Platzbedarf für Kunststoffverpackungen ohne Pfand (früher „gelbe Tonne/Sack“) plus für bepfandete Verpackungen plus für sonstigen Hausmüll (schwarze Tonne). Der Trennaufwand führt zu häufigen Fehlwürfen, da die Abgrenzung, was in welche Sammlung gehört, oftmals schwierig erscheint.

Sammler KS, Sortierer, Recycler (SuV-Unternehmen)

Erfasser, Sammler und Sortierer werden nach gesammelter Menge über das DSD-System vergütet. Wertprodukte aus der Sammlung (Metalle, reine Kunststoffe) bieten Einnahmen, während schwer verwertbare Abfälle (Sortierreste usw.) negative Einnahmen bringen. Fehlwürfe erhöhen meist die negativen Einnahmen, weil sie die Menge der Reststoffe für die kostenpflichtige Verbrennung erhöhen. Eine sachgemäße Abfallsammlung durch den Verbraucher ist deshalb gewünscht. Investitionen in moderne Sortiersysteme (z. B. nach Kunststoffsorte plus Materialform plus Farbe) müssen über Mehreinnahmen gedeckt werden und stellen ein Risiko dar für den Fall, dass diese Mehreinnahmen am Markt nicht erzielbar sind. Letztendlich lebt der Sortierer im Wesentlichen von einer Auslastung der Sortieranlage (genügend Abfälle bzw. Einnahmen über das duale System) sowie von den Verkaufserlösen für qualitativ höherwertige Sortierfraktionen. Entweder geht der Verkauf von Sortierfraktionen an externe Verarbeiter, die dann Rezyklate, Halbzeuge etc. herstellen, oder die Sortierfraktionen werden im eigenen Unternehmen in der nächsten Verarbeitungsstufe zu Regranulat weiter veredelt. Je günstiger am Ende die finale Entsorgung der hoffentlich geringen Menge an Sortierresten, umso höher der verbleibende Ertrag aus dem SuV-Prozess (Senke bzw. Entsorgungskosten). Hier ergibt sich auch der Zielkonflikt an der Schnittstelle zur thermischen Abfallverwertung. Einerseits: Sind die SuV-Kosten für eine höhere Rezyklatausbeute und -qualität größer als die auf dem Markt erzielbaren Mehreinnahmen für die Rezyklate, so wird das SuV-Unternehmen für sich die Investitionen und den Prozess technisch und kostenseitig bis zur Gewinngrenze limitieren. Die reale

Ausstattung des SuV-Unternehmens könnte somit unter dem technisch und ökologisch Machbaren bleiben. Die Entscheidungsgröße auf der anderen Seite sind die Kosten für die thermische Verwertung der Sortierreste. Je höher diese Kosten umso größer der Antrieb, die Menge an Sortierresten zu minimieren, also die Sortiertiefe zu verbessern. Als Alternative steht dem SuV-Unternehmen aber auch offen, an die MVA eine Qualität an Sortierresten zu liefern (z. B. *EBS MKS 352*), für die wenig Entsorgungskosten zu zahlen oder sogar geringfügige Einnahmen erzielbar sind. In allen drei Fällen sind für das SuV-Unternehmen als Entscheidungskriterien jedoch nicht die für eine umweltorientierte, ressourcenschonende Kreislaufwirtschaft entscheidenden LCA's oder Ökobilanzen maßgeblich, sondern rein ökonomische Erwägungen. Um genau diese Zielkonflikte im Sinne einer Circular Economy auf der Ebene der SuV-Unternehmen auszutarieren, bedarf es zwingend staatlicher Regulierungsinstrumente wie CO₂-Bepreisung, Rezyklatmindestquoten etc.

Duale Systeme

Über dieses Bündel von Zielkonflikten auf Ebene der SuV-Unternehmen stülpt sich dann noch der Wettbewerb der SuV-Unternehmen untereinander im Ringen um Marktanteile bei der Ausschreibung von SuV-Leistungen durch die dualen Systeme. Diese Zielkonflikte finden sich allerdings auch auf der Ebene der dualen Systeme selbst wieder. Diese erhalten mit den Verpackungsentgelten ihre Einnahmen, bevor Kosten für die Verwertung entstehen. Die Ausschreibung der SuV-Leistungen sollen die dualen Systeme zwar auch nach ökologischen und ressourcensparenden Kriterien vornehmen, letztlich entscheidet jedoch für eine Zuschlagserteilung – neben der Sicherheit der rechtskonformen Leistungserbringung – der Angebotspreis des SuV-Unternehmens. Angesichts des Wettbewerbs der 10 dualen Systeme untereinander und z. T. auch zu kommunalen Entsorgungsstrukturen hat jedes duale System **tendenziell** das Bestreben, die Ausgaben an die SuV-Unternehmen so gering wie möglich und die eigenen finanziellen Spielräume so groß wie möglich zu halten. Damit wird der Handlungsspielraum auf der Handlungsebene darunter, also bei den SuV-Unternehmen u. U. weiter eingeengt. So sind auch hier die oben beschriebenen rechtlichen Regularien des KrWG, VerPackG, der VgV, UvgO etc. sowie wirtschaftliche Anreize für kreislaforientiertes Handeln erforderlich, um die Sys-

teme in Richtung einer ökologisch orientierten Praxis zu lenken, die letztlich nur auf SuV- **und** auf System-Ebene gelingen kann.

Anwender von Rezyklaten

Recycler und Verwender von Rezyklaten sind an hohen Qualitätsrezyklaten interessiert. Das bedeutet, dass ein gemischter, aus vielen Komponenten bestehender Kunststoffabfall so aufbereitet sein sollte, dass er nur geringe Verunreinigungen aufweist und idealerweise nicht nur nach Kunststoffart, sondern auch nach Farbe getrennt ist und virgin materials substituieren kann. Der Preis von Rezyklaten sollte mit Neuware vergleichbar sein oder darunter liegen [24], [109]. Die regulatorischen und haftungsrelevanten Vorgaben im Sinne der Produktverantwortung müssen zwingend eingehalten werden. Das bedeutet, dass trotz sortenreiner Trennung aktuell dennoch bestimmte Märkte (z. B. Lebensmittel- und Kosmetikverpackungen aus Holsystemen) für Rezyklate weitestgehend unzugänglich sind. Trotz hoher Trennquoten kann es bei einem eventuellen temporären Überangebot (z. B. durch Preis- und andere Rahmenbedingungen, Angebotsdruck durch Neuware etc.) an passenden Verwendungen fehlen, insbesondere für weniger hohe Qualitäten, was hohe finanzielle Risiken für die Marktteilnehmer in sich birgt. Zu diesen Risiken kommen die latenten Risiken durch unentdeckte Minderqualitäten aufgrund mitgeschleppter Kontaminationen. Der Zielkonflikt zwischen dem Interesse an hohen Rezyklateinsatzquoten einerseits und qualitativen sowie rechtlichen Hemmnissen andererseits kann mittel- und langfristig zum ersten durch Steigerung der Produktqualität aufgelöst werden. Und diese ist letztlich nur im Rahmen des gesamten Kreislaufsystems vom D4R, über ein ausdifferenziertes Sammelsystem mit einem hohen Anteil an bepfandeten Mehrweg- und Einwegverpackungen bis hin zu hoher Sortierqualität und -tiefe in den SuV-Unternehmen nachhaltig erreichbar. Orientierung bietet dabei der erreichte Stand bei PET-Flaschen und dem Bottle-to-bottle-Kreislaufsystem. Zum zweiten sind kurz- oder mittelfristig, wie beschrieben, auch die rechtlichen Rahmenbedingungen im Stoff- und im Lebensmittelrecht dem zu erwartenden steten Wachstum an Rezyklatqualität und -quantität sowie der steigende Nachfrage anzupassen. Als dritter Ansatz zur Auflösung der Zielkonflikte müssen marktregulatorische Maßnahmen genannt werden wie z. B. Plastiksteuer für virgin

materials, Rezyklateinsatzquoten etc., die die Nachfrage weiter zu den Rezyklaten und weg von Neuware lenken und auf lange Sicht nachhaltige Investments in der SuV-Branche ermöglichen.

Das bedeutet, dass nur systemische Konzepte zu dem erforderlichen Quantensprung der Kreislaufwirtschaft im Kunststoffrecycling führen.

Systemischer Ansatz zur Lösung von Zielkonflikten – Beispiel PET

Ein systemischer Ansatz zur Erhöhung der Rezyklierbarkeit hat sich mit der Einführung des Flaschenpfands etabliert (hier bezogen auf PET-Flaschen, ähnliches gilt für Getränkebehälter aus Glas und Weißblech). Alle Getränkeverpackungen haben ähnliche Primäranforderungen. Die Haltbarkeit der Ware muss gewährleistet sein. Zwischen Mehrweg und Einweg kann gewählt werden. Auch wenn herstellerabhängig mit Farben variiert wird, was den Gesamtrecyclingprozess teilweise erschwert (Farbtrennung), teils erleichtert (eingefärbte Flaschen mit leichter erzielbaren optischen Ansprüchen), so können reine, meist klare PET-Rezyklate mit einer sehr hohen Recyclingquote generiert werden, die zu Produkten im Originaleinsatzbereich mit höchsten Anforderungen (Getränkeverpackungen – Lebensmittelqualität) verarbeitet werden können. Der Kunststoffkreislauf kann also geschlossen werden (geschlossener Kreislauf = starkes Recycling). Nur Restfraktionen werden nichtoriginären Anwendungsfeldern zugeführt (z. B. eingefärbte Reinigungsmittelflaschen, PET-Fasern etc., was einem offenen Kreislauf bzw. schwachem Recycling entspräche) [28].



Abb. 38: PET-Recycling [76, S. 207]

Das *Forum PET* spricht sich zudem für Initiativen zu einer weiteren Steigerung der Rezyklatquote aus, darunter die Zielmarke der *RAL Gütegemeinschaft Wertstoffkette PET-Getränkeverpackungen*. Diese sieht vor, dass PET-Getränkeflaschen mit RAL-Gütezeichen bis 2022 zu 50 % aus Recyclingmaterial bestehen sollen [200], [201].

Bedingung hierfür ist die Verwendung von standardisierten Monomaterialien sowie eine sortenreine Erfassung durch ein Pfandsystem, sodass wenig Fremdstoffe in den PET-Kreislauf gelangen, und entsprechende Logistikketten zu den dezentralen Recyclingfirmen. Der systemische Ansatz wird in dieser RAL Gütegemeinschaft bereits gelebt.

Das Getränkepfandsystem für PET-Flaschen ist ein sehr gut funktionierendes Beispiel, bei dem alle Stakeholder (Abfüller, Handel, Recycler, Flaschenhersteller) handelsstufen- und produktübergreifend in einem Verpackungsbereich eine systemische Lösung zur Erhöhung der Recyclingquote und der Produktqualität etabliert haben und ständig an einer Verbesserung des Systems arbeiten. Entsprechende Regelungen zur höheren Verwendung von Rezyklaten könnten den Prozess (z. B. Rezyklateinsatzquote, Plastiksteuer auf Neuware etc.) weiter fördern hin zu einer Circular Economy mit geschlossenen Kreisläufen.

6.3 Bewertung der Zielkonflikte

Die angesprochenen Zielkonflikte haben ihre Entsprechung in einer babylonischen Sprachverwirrung. Alle Stakeholder sprechen ihre eigene Sprache und verfolgen im Wesentlichen spezifische Interessen. Der kleinste gemeinsame Nenner ist die Notwendigkeit der Abfallbeseitigung und -verwertung und dies mit möglichst ökologischem Handeln (z. B. Grüner Punkt). Die aus dem Prozess gewonnenen Rezyklate können häufig keinem geschlossenen Kreislauf zugeführt werden, da abnehmerseitig geforderte Spezifikationen (Lebensmittelkontakt) nicht erfüllt oder keine anderen wirtschaftlichen Anwendungen gefunden werden können. Eine Schlüsselrolle zur Verbesserung der Rezyklatqualität und zur Erhöhung der Rezyklateinsatzquoten kommt den Verpackungsherstellern und dem Handel zu. Designrichtlinien helfen zur Orientierung für ein kreislauforientiertes Verpackungsdesign, führen aber oftmals

noch nicht zu qualitativ homogenen, breit einsetzbaren Rezyklaten. Im Falle des PET-Flaschenrecyclings konnten Primärfunktionen und andere zusätzliche Verpackungsfunktionen durch die involvierten Akteure kooperativ systemisch ausgehandelt und gelöst werden, sodass universell einsetzbare Rezyklate, z. gr. T. sogar für die ursprünglichen Anwendungen (Bottle to Bottle) gewonnen werden können. Die hohen Vorgaben des Gesetzgebers für Recycling- und Rezyklateinsatzquoten bei PET-Flaschen sowie die materialspezifische Möglichkeit für höhere PCR-Gehalte bei Lebensmittelanwendungen bildeten eine entscheidende Voraussetzung für dieses konsensorientierte Agieren auf allen Stufen des Stoffkreislaufes. Umgekehrt ermöglichten die hohe Qualität der Rezyklate und der Verwertungsverfahren sowie die Transparenz aller Prozesse von der Ursprungs- bis zur Neuware es dem Gesetzgeber, dem PET beim Lebensmittelrecht eine Sonderrolle einzuräumen.

Das bedeutet, dass eine systemische, kooperative Vorgehensweise aller Stakeholder Zielkonflikte auflösen kann und neue Wege hin zu geschlossenen Recyclingkreisläufen möglich sind.

Idealerweise lassen sich geschlossene Kreisläufe, bei denen das Rezyklat in der ursprünglichen Anwendung wieder eingesetzt werden kann, bei **großvolumigen Produktmengen, ähnlicher Funktionalität und einheitlich verwendbaren Materialien** erreichen.

Im Verpackungssektor könnte dies dadurch erreicht werden, dass systemische Lösungen analog der *RAL Gütegemeinschaft PET* erweitert werden, indem getrennte Sammelsysteme für eine eingeschränkte Materialauswahl mit leicht trennbaren Materialien auf einem zu definierenden Qualitätsniveau (z. B. Gewährleistung Lebensmittelqualität, Sortenreinheit, Farbreinheit etc.) etabliert werden. Auf Basis des definierten Qualitätsniveaus muss überlegt werden, welche Art von Sammelsystem dazu geeignet ist und inwieweit der Verbraucher dazu beitragen kann.

Systemische Wege, die ein hochreines, universell einsetzbares Rezyklat ermöglichen, sollten dabei durch weitere geeignete Maßnahmen gefördert werden: Einschränkung beim Produktdesign auf standardisierte Monomaterialien oder leicht trennbare Schichtverpackungen, Justierung der Produktion auf diese Materialien unter Berücksichtigung von Rezyklaten aus sortenreiner

Sammlung und unter Vermeidung von Kontaminationen (z. B. Anreizsystem durch Pfand oder andere Geld-zurück-Systeme), gemeinsames Verständnis des Abfalls als Wertstoff für ein hochqualitatives Recycling bis hin zur universellen Einsatzfähigkeit.

Eine so fokussierte Erweiterung derartiger hocheffizienter, systemischer Lösungen analog zum PET-Flaschenrecycling kann sicher nicht auf alle Verpackungen oder allgemein auf alle Kunststoffprodukte übertragen werden, da häufig die Funktionalität und die verpackten Produkte sehr unterschiedlich sind oder eine getrennte Erfassung aufgrund der Kleinteiligkeit unwirtschaftlich erscheint. (siehe Anhang 1 sowie Tabelle 23) Als negatives Beispiel seien die gescheiterten Versuche genannt, Coffee-to-go-Becher einzusammeln und die Pappe sowie die PS-Kunststoffschicht zu recyceln. Kosten und CO₂-Footprint für die Erfassungslogistik standen in keinem Verhältnis zum möglichen Erlös und Umweltnutzen. Als positives Beispiel steht das Berliner Start-up *Circleback*, das in Pfandautomaten hochwertige Kosmetikverpackungen sammelt und zu zweckgleichen Verpackungen verarbeitet [202].

Für andere, nicht für Bring- und Pfandsysteme geeignete Kunststoffe, müssen weiterhin universelle Sammelsysteme zur Verfügung stehen, die insbesondere nach Wertstoffen bzw. deren Trennbarkeit zu unterscheiden sind (gelbe Tonne). Eine Effizienzsteigerung kann auch hier durch D4R bei den Kunststoffverpackungen und -produkten erreicht werden. Auch hier sollte ein Weg zur Vereinheitlichung hin zu einem systemischen Ansatz gefunden werden, der letztlich zu höheren Rezyklatqualitäten führt. – Analog der *RAL Gütegemeinschaft PET*, bei der Produzenten und Handel eine entscheidende Rolle ausüben und für die die Sekundärfunktionen, wie die Erkennbarkeit einer Marke mit großer Individualität, dennoch von großer Bedeutung sind. Den Stakeholdern, die auf dem Markt u. U. auch als Wettbewerber agieren, ist dennoch gelungen, alle notwendigen Spezifikationen, Qualitätsmaßstäbe, Umsetzungsmaßnahmen usw. auszuhandeln.

Ein Schlüssel für derartige Lösungen können große Handelsmarken mit klaren Spezifikationsvorgaben an die Verpackungshersteller sein, da in dieser Konstellation die herstellerspezifischen Sekundärfunktionen bei den Verpackungslösungen am wenigsten berührt werden.

So hat z. B. der Hersteller von Haushaltchemie *Frosch* nicht nur Auszeichnungen für seine Ökoprodukte erhalten, sondern auch den *Deutschen Nachhaltigkeitspreis Design 2021 für kreislauffähige Verpackungen*. Dem Konzern ist es gelungen, alle Flaschenbehältnisse aus seinem Hause zu 100 % auf rPET bzw. rPE-HD aus der Gelben-Sack-Fraktion umzustellen [203]. Mit der Marke *Frosch* werden beim Verbraucher, aber auch seitens der Zulieferunternehmen, des Handels und der Werbebranche umweltgerechte Produkte und ein D4R für die Verpackungen assoziiert, dies ist der Kern der Marke. Indem dieser Markenkern **über** alle Stufen der Wertschöpfungskette bis zum Endverbraucher nicht nur kommuniziert, sondern auch praktisch umgesetzt und jeder Stakeholder mitgenommen wird, entsteht ein Multiplikatoreffekt im Sinne des umweltorientierten Umbaus der Wirtschaft. Auf diese Weise werden – quasi en passant – auch die Zielkonflikte aufgelöst, die sich z. B. aus den verschiedenen Verpackungsfunktionen oder an den Schnittstellen entlang der Wertschöpfungskette ergeben. (Aufgrund dieser Unternehmens-DNA bräuchte *Frosch* **möglicherweise** nicht einmal solche staatlichen Regularien wie Rezyklateinsatzquoten, Plastiksteuer auf Kunststoffneuware oder eine CO₂-Bepreisung von Sortierresten oder MVA. Unmittelbar vorteilhaft indes wären z. B. Abschläge bei den Verpackungsentgelten.)

Aber auch für *Frosch* z. B. gilt: Trotz allem Aufwand für D4R und trotz aller technischen Möglichkeiten bei der Erfassung, Sortierung und dem Recycling können bestimmte Verpackungsfunktionen häufig nur durch sehr komplexe Materialmischungen erzeugt und/oder unter Einbeziehung von virgin materials sichergestellt werden. Stehen weder geschlossene noch offene Recyclingkreisläufe zur Verfügung oder ist ein Kunststoff nach mehreren Verwendungszyklen mechanisch nicht mehr aufzubereiten, so kann ggf. das chemische Recycling einen Weg bieten. Aber auch hier gilt, dass Kontaminationen weitestgehend zu vermeiden sind [22]. Für kontaminierte, sehr heterogene Ströme aus zeitlich nicht zuordenbaren Komponenten (z. B. Sperrmüll aus Kunststoffen, Bauabfälle mit nicht mehr zulässigen Komponenten wie Weichmachern), nicht trennbare Verbundmaterialien etc. bleibt nach jetziger Kenntnis nur eine thermische Verwertung, um die Zielkonflikte, die sich aus der Verwertungshierarchie ergeben, zu lösen.

Kurzgefasst: Können Systemlösungen für bestimmte Kunststoffmassenprodukte, bei der alle Stakeholder beteiligt sind, erreicht werden, so kann das Cradle-to-cradle-Prinzip bzw. eine Circular Economy weitestgehend umgesetzt werden. Werden allerdings bestimmte Materialien hinsichtlich eines speziellen Designs optimiert, die Recyclingfähigkeit aber nur im Prinzip erreicht (z. B. hohe Verwertungsquote, aber kein oder nur minderwertiges Rezyklat), so ist eine Wiederverwertung von Kunststoffabfällen letztlich nicht oder nur in eingeschränktem Maße gegeben.

7 Perspektiven und Handlungsoptionen

Für die derzeit großen Mengen an Kunststoffabfällen, wie die aus den Leichtverpackungen stammenden Folien- und Mischkunststoffe, die zwingend einer Verwertung zugeführt werden müssen, besteht eine besondere Notwendigkeit in Hinblick auf eine wesentliche Verbesserung der Reinheit der Abfälle als Basis für einen effektiveren SuV-Prozess und für bessere Rezyklatqualitäten. Aus wirtschaftlicher Sicht müssen der entsprechende Aufwand für Sammlung, Sortierung und Granulierung sowie die Unkosten der minderwertigen Verwertungswege und Verbrennung über die Einnahmen des Grünen Punkts und aus dem Verkauf der Rezyklate mindestens gedeckt werden.

Die Potenziale liegen zunächst bei einem konsequenten Design for Recycling. Sammeln und Sortieren wird umso effizienter, je höher der Anteil an monopolymeren oder leicht in seine Materialfraktionen zu zerlegenden Produkten bzw. Verpackungsmaterialien ist. Dazu ist die Entwicklung entsprechender Leitlinien für das Produktdesign eine elementare Voraussetzung. Im Kern müssen derartige Leitlinien darauf zielen, dass die einzelnen Kunststoffsorten möglichst störstofffrei anfallen (wenig Füllstoffe, Additive, Co-Polymere, Composite, Etiketten, Kleber etc.).

Stünden verbesserte Sammel-, Sortier- und Verarbeitungssysteme zur Erzeugung reinerer Rezyklate bei einem durch D4R ermöglichten geringeren Systemaufwand zur Verfügung, so könnten die Preise für Rezyklate aus dem werkstofflichen Recycling bei gleichzeitig höherer Qualität sinken und die Rezyklate einen größeren Absatzmarkt finden. Gleichzeitig stünden größere Mengen an Qualitätsrezyklaten zur Verfügung, was deren Nutzung in der Industrie attraktiver machen und Neuware-Kunststoffe nachhaltig substituieren würde.

Ziel wäre es, an einer frühen Stelle des SuV-Prozesses ein bereits aufgetrenntes Kunststoffabfallgemisch (Beispiel in Tabelle 2) zu erhalten, so dass weniger Verunreinigungen in die folgenden Bearbeitungsschritte mitgenommen werden. Die Potenziale bei den Sammelsystemen liegen quantitativ in der Sammelquote, qualitativ in einer getrennten Erfassung der Kunststoffabfälle nach der Abfallart (PCL, Hartschalen, Flaschen, sonstige Hohlkörper), Kunststoffsorte, Farbe und Herkunft. Bringsysteme haben hier offenbar einen Vorteil gegenüber

Holsystemen. Daher werden Pfandsysteme europaweit immer notwendiger, sie müssen erweitert werden, auch über den Einsatz bei PET-Flaschen hinaus. Und sie müssen sinnvoll verzahnt werden mit weiteren Bringsystemen wie Wertstoffsammlungen sowie mit den weiterhin erforderlichen Holsystemen wie die gelbe Tonne (siehe Abschnitt 3.2.2).

Für das Gelingen des notwendigen Quantensprungs bei der Kreislaufwirtschaft müssen die logistischen und technischen Maßnahmen flankiert werden von einer adäquaten Anpassung der rechtlichen Rahmenbedingungen, von regulatorischen Maßnahmen zur Substituierung von Neukunststoffen durch Rezyklate und zur Reduzierung des Anteils des Verwertungspfades Verbrennung sowie durch Forschung und Entwicklung zu allen Teilprozessen und -bedingungen des Kunststoffrecyclings.

7.1 Perspektiven

Im Folgenden sollen mögliche **Perspektiven** aufgezeigt werden, die einmal auf der derzeitigen Abfallentsorgung basieren (Perspektive 1) und zum anderen wertstofforientiert hinsichtlich einer Circular Economy mit möglichst geschlossenen Kreisläufen ausgerichtet sind.

Definierte Kunststoffabfälle	Undefinierte Kunststoffabfälle	Kunststoffhaltige Restabfälle
Perspektive 1: Status quo beibehalten		
Bringsysteme nach dem Vorbild „PET-Flaschen-Pfand“	Gelbe Tonne, Wertstofftonne usw. Branchenlösungen	Schwarze Tonne
Perspektive 2: stark reglementiert Kunststoffkreisläufe		
Zentral definierte Kunststoffabfälle nach Vorbild PET-Flaschen-Pfand, aber auch Holsysteme, mit vorgeschriebenen, definierten Verpackungstoffen		Schwarze Tonne
Perspektive 3: Wertorientierte Sammlung und Verwertung		
Dezentrale Weiterentwicklung und Ausweitung der Bringsysteme nach dem Vorbild PET-Flaschen-Pfand	Restwertstoffe	Schwarze Tonne

Abb. 39: Drei Perspektiven der Verbesserung des Kunststoffrecyclings
(Quelle: eigene Darstellung)

7.1.1 Perspektive 1: Status quo beibehalten

Der Gesetzgeber verlangt die bekannten Recyclingquoten und greift in die Produktgestaltung auf Basis von Abgaben (CO₂, Rezyklierbarkeit) ein. Die Recyclingunternehmen und Inverkehrbringer arbeiten daran, dass die vorgegebenen Quoten erfüllt werden.

Die Problematik hinsichtlich hochqualitativer Rezyklate in ausreichenden Mengen im Sinne einer Circular Economy wird hier jedoch nicht erreicht werden können, da eine Zulassung für technische und lebensmitteltaugliche Anwendungen kaum durchsetzbar ist. Es ist jedoch möglich, dass dadurch Mehrwegsysteme einen Vorteil haben [204].

Das chemische Recycling kann für qualitativ minderwertige Kunststoffabfälle in Frage kommen. Dabei wird – mit erheblichen Stoffverlusten und Aufwand – die Herstellung von virgin-grade-Material erreicht.

Perspektive 1
Stärken ▪ Bewährtes System, keine Veränderung notwendig ▪ Sammelquote hoch ▪ Recyclingquote optimierbar
Schwächen ▪ Verbesserung des Rezyklateinsatz nur in kleinen Schritten möglich ▪ Großer technischer Aufwand für Verbesserungen ▪ Wiedereinsatzquote gering (keine hochwertigen Rezyklate in ausreichenden Mengen) ▪ Begrenzte Rezyklatqualität durch Holsysteme
Chancen ▪ Bei dauerhafter Erhöhung der Rohstoffpreise erhöht sich die Nachfrage nach Rezyklaten ▪ Optimierung durch Verbesserung der gesetzlichen Rahmenbedingungen
Risiken ▪ Stagnation und Effizienzverluste gegenüber anderen Systemen ▪ Mengenvorgaben werden nicht erreicht

7.1.2 Perspektive 2: Stark reglementierte Kunststoffkreisläufe

Der Gesetzgeber gibt mit Hilfe von wissenschaftlichen Gremien vor, welche Kunststoffe mit welchen Additiven und Compounds für welche Anwendung verwendet werden dürfen. Die Auswahl der Materialien und die entsprechenden Sammel- und Recyclingsysteme müssten ebenfalls vorgegeben werden. Voraussetzung hier ist, dass tatsächlich ein systemisches Gremium⁷⁵ sich auf effiziente Maßnahmen einigen kann.

Eine circular economy könnte auf diesem Wege mittelfristig umgesetzt werden. Das chemische Recycling bekommt darin für bestimmte Abfallfraktionen einen festen Platz zugewiesen. Inwieweit ein derartiges System flexible Eigenschaften im Sinne von Reaktion auf technische, gesellschaftliche und weitere Entwicklungen aufweist, müsste untersucht werden.

Ein chemisches Recycling kann für qualitativ minderwertige Kunststoffabfälle in Frage kommen, insbesondere für durch Nutzung (z. B. UV-Einwirkung) oder Recycling degradierte Kunststoffe.

Zusätzlich oder als mögliche Realisierung kann das Mehrweg- gegenüber dem Einweg-Verpackungsprinzip Vorrang gegeben werden. (z. B. wurden Versuchsprojekte zur EDEKA-Mehrwegbox verstetigt, siehe Anlage 1, [205]) – Dies jedoch ohne grundsätzlich auf die Einweg-Option zu verzichten, wo dies die ökologischere Variante ist, bspw. bei LVP-Folien.

⁷⁵ Ein solches Gremium wäre noch zu bilden und müsste die Belange aller relevanten Stakeholder entlang der Wertschöpfungskette von Kunststoffverpackungen widerspiegeln. Möglicherweise könnte hier auch ein bereits existierendes Gremium wie z. B. die *Zentrale Stelle Verpackungsregister* die beschriebenen Funktionen übernehmen.

Perspektive 2

Stärken

- Gute Recyclingfähigkeit von vielen Verpackungen
- hochwertige Rezyklate in ausreichenden Mengen
- Einsparungseffekte durch Einsparung der gelben Tonne
- Kunststoffe, die schon derzeit in der schwarzen Tonne landen, werden mit erfasst.

Schwächen

- Neues System, die Wirkung muss erst getestet werden
- Hoher Regulierungsaufwand
- Marktineffizienzen, hoher organisatorischer und Kontrollaufwand
- Zielkonflikte müssen regulativ gelöst werden. Wenn sich die Gegebenheiten ändern, muss nachreguliert werden.
- Ständige Anpassung des Systems notwendig.

Chancen

- Vereinfachung der gesamten Kunststoffchemie, da ein großer Teil des Kunststoffbedarfes vereinfacht wird.
- Verbesserung der chemischen Recyclebarkeit von schlechten und gemischten Kunststoffchargen.
- Potenzial von PET könnte noch stärker ausgenutzt werden

Risiken

- Einschränkung der technischen Entwicklung, Verschlechterung der Wirtschaftsleistung
- Technologieoffenheit gefährdet
- Akzeptanz in der Bevölkerung könnte sinken, wenn Regulierung nicht genau trifft.

7.1.3 Perspektive 3: Wertorientierte Sammlung und Verwertung

Analog zum PET-Flaschenpfand bilden sich aus allen Stakeholdern Interessensgemeinschaften, (z. B. RAL-Gütegemeinschaften) für bestimmte Anwendungen, die Lösungen zur sortenreinen Sammlung und zu recyclingfähigen Produkten erarbeiten. Diese Lösungen können über Pfandsysteme oder/und spezielle Wertstofftonnen erreicht werden. Da alle Stakeholder vom Inverkehrbringer bis zum Recycler gemeinsam Lösungen erarbeiten, wird dadurch ein effizientes System für bestimmte Kunststoffsegmente entstehen, die quantitativ und qualitativ interessant sind.

Der Gesetzgeber hat die Aufgabe dies zu fördern und zu initiieren. Kunststoffabfälle, die nicht spezifisch in ein derartiges System aufgrund der Kleinteiligkeit passen, werden wie bisher gesammelt (Grüner Punkt, Wertstofftonnen, Wertstoffhöfe, graue Tonne).

Das bestehende Sammel- und Sortiersystem kann erhalten bleiben, auch wenn die wertbringendsten Abfälle mehrheitlich alternativ gesammelt und verwertet werden. Das chemische Recycling kann für diese Restkunststoffabfälle geeignet sein.

Aber stets gilt: Mehrweg geht vor Einweg, werkstoffliches Recycling hat den Vorrang vor dem chemischen Recycling und das stoffliche Recycling vor der thermischen Verwertung – solange die Ökobilanz in jedem Einzelfall besser ist. (Siehe auch Anlage 1, [205]).

Perspektive 3	
Stärken	▪ Ausweitung eines bewährten Systems ▪ Sortieraufwand geringer ▪ Störstoffe durch Sammlung weitgehend ausgeschlossen ▪ Wertstoffe zu keinem Zeitpunkt des Kreislaufes Abfall
Schwächen	▪ Holsysteme für Restfraktionen trotzdem notwendig ▪ Hoher organisatorischer und logistischer Aufwand ▪ Pfandhöhe muss von Gesetzgeber/Systemweit angepasst werden
Chancen	▪ Möglicherweise Vorstufe für Mehrwegsysteme (bisher eher Gegenteil der Fall) ▪ Effektivität des Recycling durch geringere Verunreinigung verbessert ▪ Differenzierte Betrachtungsweise möglich
Risiken	▪ Ökobilanz bei bestimmten Produkten nicht immer optimal

Der Unterschied der Perspektiven kann anhand der Tabelle 24 erklärt werden. Will man mengenmäßig eine hohe Rezyklatqualität erreichen, dann sind die Perspektive 2 und 3 am sinnvollsten. Beide erfordern jedoch eine hohe Akzeptanz beim Verbraucher. Am leichtesten zu realisieren ist naturgemäß Perspektive 1, der Status quo.

Für eine schrittweise Einführung eines qualitätsoptimierten Recyclingsystems bei gleichzeitig hoher Recyclingquote kann über eine Erweiterung der bestehenden Bringsysteme auf Kosten der Holsysteme nachgedacht werden. Dies würde zunächst Schalen und Hohlkörper betreffen. Gegebenenfalls ist auch eine sortenreine Sammlung von Folien sinnvoll, da es sie in der Vergangenheit schon gab [206] bzw. im industriellen Maß noch gibt [207].

Kunststoff- produkte nach der Nutzung	Heute		Potenzial Zukunft		Beispielhafte Treiber für mehr Recycling
	Sammel- system	Einsatz	Sammel- system	Einsatz	
PET- Flaschen	Bring- system mit Pfand Ein- und Mehrweg	rPET-Flaschen, andere Anwen- dungen	Bring- system Ein- und Mehrweg	→ 100 % rPET durch bessere Techno- logien	RAL Gütegemeinschaft
PVC aus dem Baube- reich (z. B. Rewindo)	Bring- system	Neue Fenster im nicht sichtbaren Bereich	Bring- system	rPVC-Anteil steigend	REWINDO bzw. VinylPlus)
Schalen (Trays) aus PET, PP, ...	Hol- system	Fraktionen DSD; kein Lebens- mittelkontakt	Bring- system Ein- und Mehrweg	Neue Scha- len für Le- bensmittel- kontakt?	Arbeitskreis (AK) PET-Schalen EDEKA [208]
Hohlkörper (aus Lebens- mittel-/ Kos- metikverpa- ckungen)	Hol- system	Fraktionen DSD; kein Lebens- mittelkontakt; Teilweise Bottle- to-bottle (Rei- nigungsmittel)	Bring- system? Ein- und Mehrweg	Bottle-to- bottle Neue Fla- schen für Lebens- mittel und Kosmetik	EREMA FDA Bestätigung PCR-PE-HD für Lebensmittel- direkt-Kontakt ⁷⁶
PE-Folien (klar)	Hol- system	Fraktionen DSD; kein Lebens- mittelkontakt; Neue Folien	Bring- system?	Neue klare Folien?	Einzellösungen ⁷⁷ Vor DSD getrennte Sammlung und Nutzung trans- parenter PE-Folien LAKUFOL [206]
Sonstige Kunststoffe	Hol- system	stark in ther- mische Ver- wertung	Hol- system gelbe/ schwarze Tonne	Sortierung? chemisches Recycling? Thermische Verwertung	

Tab. 23: Potenzial der Veränderung zur Schließung von Stoffkreisläufen in Deutschland (Perspektive 3) – Holsystem: rot, Bringsystem: grün (Quelle: eigene Darstellung)

⁷⁶ Das Unternehmen EREMA hat für seine Rezyklate eine FDA-Zulassung in den USA. „Ausgangsmaterial ist ein definierter Inputstrom, der zu 99 Prozent aus lebensmitteltauglichen PE-HD-Verpackungen, z. B. Milch- und Saftflaschen, besteht.“ [209].

⁷⁷ Sortenreine Sammlung; „Wenn PE-Folien sauber und sortenrein getrennt werden, können diese recycelt werden. Das schont wertvolle Ressourcen. Die reinen Folienabfälle werden zerkleinert und anschließend agglomeriert. Bei dieser Anhäufung entsteht Granulat, welches wieder in der Produktion von Folie eingesetzt werden kann. Somit kann der Kreislauf bei der Entsorgung von Folie wieder geschlossen werden.“ [207].

Ein weiteres positives Beispiel in den vergangenen Jahren ist die sortenreine Sammlung und Verwertung von PVC-Abfällen (Abb. 11). Durch sie konnten große Steigerungen der Recyclingquoten im Bausektor erreicht werden. Ähnliches gilt wie schon oft erwähnt für das PET-Flaschenrecycling (RAL Gütegemeinschaft).

Wichtig für den Erfolg war und ist, dass alle wesentlichen Stakeholder zusammen ein Konzept der Produktion und Wiederverwertung erarbeiten und stetig verbessern. Alle Wissensträger tragen zum Gesamtziel bei, ohne sich in Zielkonflikte unter den einzelnen Player zu verlieren, da das übergeordnete Ziel, hohe Recyclingquoten bzw. Umweltschutz und Kosteneffizienz im Vordergrund stehen.

7.2 Instrumente

Zur Umsetzung der jeweiligen Perspektive und Optimierung müssen zusätzlich Maßnahmen ergriffen werden.

Auf Basis des vorliegenden Gutachtens schlagen die Autoren folgende Instrumente vor, um die Qualität und Quantität der Rezyklate zu erhöhen.

Wertung hinsichtlich deren Beitrag zu den einzelnen Perspektiven wird mit

- ++ essentiell,
- + hilfreich und
- 0 untergeordneter Beitrag,
- ggf. schädlich

in der Reihenfolge Perspektive 1/2/3 gekennzeichnet.

Instrument	Bewertung Perspektiven 1/2/3
Technische Instrumente	
Verbindliche Qualitätsstandards für Rezyklate einführen	++ / ++ / ++
Design for Recycling fördern (Materialauswahl, Demontierbarkeit, Trennbarkeit, Gestaltung, ...)	++ / ++ / ++
Sammelwege sortenrein und kontaminationsfrei gestalten (Bring-system, Pfand, Mehrweg)	0 / ++ / ++
Effiziente Sortiersysteme und Recyclingmethoden etablieren (z. B. Repolymerisation PET)	++ / + / +
Nutzung von KI bei Sammel- und Pfandsystemen einführen, um Rückverfolgbarkeit zu gewährleisten (z. B. um schadstoff-beladene Produkte auszusortieren; Basis: Verpackungslabel gem. DIN 91446:2021-10 + allgemein zugängliche Datenbank; Marker etc. dürfen nicht in reine Rezyklate kommen); KI für umfassende Produktinformation einschließlich für Verpackungsrecycling nutzen	+ / – bzw. ++ / – bzw. ++/++ ⁷⁸
Schadstoffentfrachtung/Schadstoffsinken bereitstellen (Wo reichern sich Schadstoffe an?) – Downcycling, chem. Recycling , thermische Verwertung	++ / 0 / 0
Chemisches Recycling als festen Bestandteil der Verwertungs-kaskade vor dem Hintergrund der sinkenden Materialqualität und der Schadstoffausschleusung einführen	++ / + / +
Neuentwicklung von Verpackungskunststoffen mit gezielter Obsoleszenz (qualitative Sollbruchstellen) einführen	+ / 0 / 0
Wirtschaftliche Instrumente	
USt. auf Produkte mit einem Mindestanteil an Rezyklaten für Konsumenten absenken „Plastik-Steuer“ auf Nutzung von Virgin materials steuerliche Boni für zertifizierte Produkte in Abhängigkeit vom Rezyklatgehalt Sonderabschreibungen für recyclingorientierte Technik-anpassungen rezyklatbasierte Produkte bei der öffentlichen Beschaffung bevorzugen	+ / + / +
Recyclingabgaben für MVA und/oder Reststoffe aus dem SuV-Prozess für thermische Verwertung zeitnah einführen (Bei Festlegung der Höhe auf eine entsprechende Lenkungswirkung achten).	++ / 0 / 0

78 Siehe 5.4: „–“ verweist auf den Umstand, dass Marker das Rezyklat verschlechtern können, „++“ steht für die Möglichkeit, dass Marker z. B. dazu beitragen können, gefährliche Stoffe zu detektieren.

Instrument	Bewertung
Regulatorische Instrumente	
Informationspflicht für Hersteller über die Rezyklierbarkeit ihrer Produkte und die Verwendung von Rezyklaten einführen (Kennzeichnung)	+ / ++ / ++
Mehrweg-Verpflichtungen für Verpackungshersteller und den Handel erweitern	0 / ++ / +
Vorgaben für Substitutionsquoten (Mindestrezyklatquote) für Kunststoffverarbeiter und -inverkehrbringer	+ / ++ / +
einheitliche, auf Normen basierende Regelungen zum Rezyklatgehalt von Kunststoffprodukten (z. B. auf Basis DIN EN ISO 14021:2016)	+ / ++ / +
Staatliche Recyclingquoten und Qualitätsstandards für Rezyklate einführen	+ / ++ / 0
RAL-Gütezeichen Recyclingkunststoff zur gesetzlichen Qualitätsverpflichtung machen (Zertifizierung)	0 / + / ++
Transparenz-Regelungen für den Rezyklateinsatz (Rückverfolgbarkeit der Liefer- und Herstellungskette)	0 / ++ / 0
Verpflichtung zur Codierung von nicht recyclinggerechten Stoffen in Kunststoffmaterialien für eine KI-gestützte Sortierung einführen	+ / ++ / +
Gesetzliche Grundlagen (KrWG, VerpackG, Lebensmittelrecht, REACH) auf die Qualitätserhöhung und ausgeweiteten Kontrollmöglichkeiten bei Rezyklaten und Rezyklatanwendungen anpassen; 3-fache Absicherung gem. EU-Regelung 282/2008 für Food-Anwendung in 2-fache umwandeln; Verbindlichkeit § 45 KrWG für VgV + UvGO über Gesetzesnovellen	++ / + / +
Institutionelle Instrumente	
verbindliche Prüf-/Zertifizierungsstellen für Rezyklate und Rezyklatanwendungen (z. B. in Anlehnung an RAL)	0 / + / ++
Etablierung bzw. Freigabe zentraler Datenbanken, um die (detaillierten) Produktdatenblätter für alle Anwender, Recyclingunternehmen, Prüfstellen, Konsumenten etc. verfügbar zu machen	0 / ++ / +
Erweiterung der Kompetenzen des Zentralen Verpackungsregisters (Ausbau zur Behörde).	0 / 0 / 0
Instrumente Schulungs- und Qualifizierungsangebote	
recyclingorientierte Weiterbildungsangebote über Bildungseinrichtungen, IHK, HWK anbieten	0 / + / +
Recycling und Rezyklatanwendungen als fester Bestandteil in relevanten Ausbildungsrichtungen einführen	0 / + / +
zur Steigerung der Akzeptanz Konsumenten bilden und Marketing hinsichtlich Umgang mit Abfallströmen erhöhen (produktbezogene Verpackungs-Apps mit Recyclinghinweisen etc.)	0 / ++ / ++

Tab. 24: Instrumente zur Umsetzung der Perspektiven (Quelle: eigene Darstellung)

Hinsichtlich der dargestellten Perspektiven haben die vorgeschlagenen Instrumente eine unterschiedliche Bedeutung, da sie entweder das Abfallentsorgungssystem (Perspektive 1) optimieren noch die Werterhaltung entsprechend einer Circular Economy stärken (Perspektive 2 und 3). Aufgrund der positiven Erfahrung beim PET-Flaschenrecycling und dem Rewindow-Programm empfiehlt es sich auf jeden Fall, dass die Stakeholder bestimmter Kunststoffprodukte an einer effizienten, werterhaltenden Kreislaufgestaltung mit all ihrem Experten mitwirken. Geeignete gesetzgeberische Anreize (siehe Tabelle 24) können dies fördern.

Eine zeitliche Schiene wird bei Wilts et al. S. 304 [8] vorgeschlagen (siehe Abb. 40). Angepasst auf Tabelle 24 würde das verallgemeinert bedeuten, dass Sekundärrohstoffe im Image aufgewertet werden. Als erstes sollten dann Branchenlösungen, am besten um sortenreine Rezyklate zu erzeugen, initiiert werden, was zu einer erhöhten Rezyklierbarkeit (Design for Recycling) und verbesserten Sammelsystemen (Pfand) führen kann. Gesetzliche Vorgaben können diesen Prozess beschleunigen, da im Falle einer Nichterreichung finanzielle Einbußen, sei es durch Sanktionen oder verpasste Anreize, drohen.

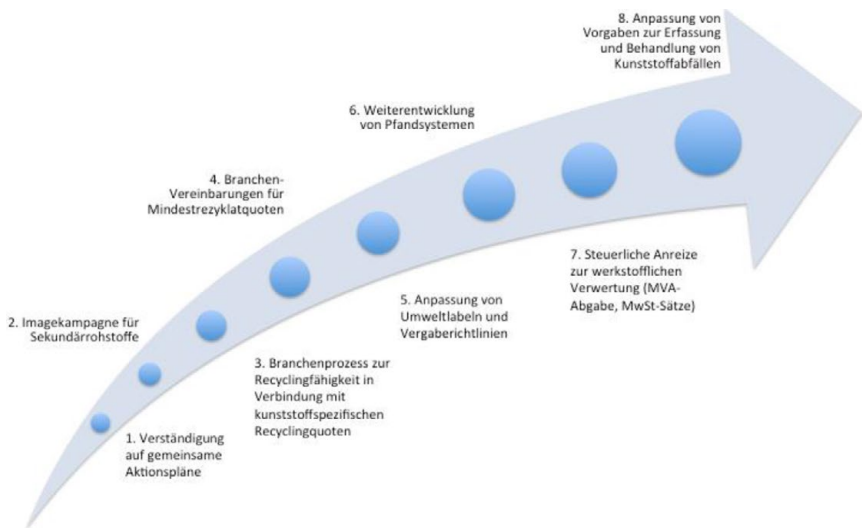


Abb. 40: Zeitliche Schiene zu einer möglichen Umsetzung [115, S. 304]

Literatur

- [1] Ist Recycling eine notwendige oder hinreichende Bedingung für eine nachhaltige Verpackung? Veranstaltung: PolyMerTec 9.6.2021, Foliensatz, Dinkel, F., Merseburg 2021
- [2] Ökobilanzen. Marktsegmente und Konsumgüterverpackungen, in: ALPLA Positionspapier: Weiterentwicklung politischer Rahmenbedingungen für funktionierende Kreislaufwirtschaft von Kunststoffverpackungen, Fehringer, R., Hard 2021
- [3] Papierverbunde: Mehr Abfall und weniger Recycling? EU-Recycling Magazin 2021 06/2021, S. 21
- [4] Untersuchung der ökologischen Bedeutung von Einweggetränkebehältern im Außer-Haus-Verzehr und mögliche Maßnahmen zur Verringerung des Verbrauchs. Abschlussbericht. Texte 29/2019, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau 2018
- [5] Stoffstrombild Kunststoffe in Deutschland 2019, Kurzfassung, Lindner, C., Schmitt, J. u. Hein, J., 2020
- [6] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz: Zusammensetzung des Hausmülls in Deutschland. Infografik, 2020. <https://www.bmu.de/media/zusammensetzung-des-hausmuells-in-deutschland>, abgerufen am: 05.05.2022
- [7] Stoffstrombild Kunststoffe in Deutschland 2017. Langfassung, Lindner, C. u. Schmitt, J., 2018
- [8] Steigerung des Kunststoffrecyclings und des Rezyklateinsatzes, Position/Oktobre 2016, Wilts, H., Gries, N. von, Dehne, I., Oetjen-Dehne, R., Buschoff, N. u. Sandem, J., Dessau-Roßlau 2016
- [9] DIN ISO 1043-1:2016-09. Kunststoffe – Kennbuchstaben und Kurzzeichen – Teil 1: Basis-Polymere und ihre besonderen Eigenschaften (ISO 1043-1:2011 + Amd.1:2016); Deutsche Fassung EN ISO 1043-1:2011 + A1:2016. <https://www.beuth.de/de/norm/din-en-iso-1043-1/254567106>, abgerufen am: 23.06.2022

-
- [10] Maier, R.-D. u. Schiller, M. (Hrsg.): Handbuch Kunststoff Additive. München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG 2016
 - [11] Osswald, T. A. u. Menges, G.: Material science of polymers for engineers. München: Hanser 2012
 - [12] Roosen, M., Mys, N., Kusenberg, M., Billen, P., Dumoulin, A., Dewulf, J., van Geem, K. M., Ragaert, K. u. Meester, S. de: Detailed Analysis of the Composition of Selected Plastic Packaging Waste Products and Its Implications for Mechanical and Thermochemical Recycling. *Environmental science & technology* 54 (2020) 20, S. 13282–13293
 - [13] Stapf, D., Seifert, H. u. Wexler, M.: Thermische Verfahren zur rohstofflichen Verwertung kunststoffhaltiger Abfälle. In: Thiel, S., Thomé-Kozmiensky, E., Quicker, P. u. Gosten, A. (Hrsg.): Energie aus Abfall. Neuruppin: Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH 2020, S. 358–375
 - [14] Hemmnisse für den Rezyklateinsatz in Kunststoffverpackungen. Kurzfassung, gym, Mainz 2019
 - [15] Heuser, M.: Charakterisierung des Öffnungsverhaltens von versiegelten Verbundfolien mit kohäsivem Versagensmechanismus, Shaker u. Shaker Verlag. Düren 2021
 - [16] DER SPIEGEL (online): 600 Chemikalien in einem Joghurtbecher sind irre. DER SPIEGEL (online) 2018. <https://www.spiegel.de/video/cradle-to-cradle-michael-braungart-ueber-plastik-video-99019961.html>, abgerufen am: 9.5.2022
 - [17] Aufkommen und Verwertung von Verpackungsabfällen in Deutschland im Jahr 2019. Texte 148/2021, Alexandar Burger, Nicolas Cayé, Corinna Jaegermann u. Kurt Schüler, 2021
 - [18] The Circular Economy For Plastics. A European Overview, PlasticsEurope, 2022
 - [19] Circular Economy für Kunststoffe Neu Denken. Wie die Transformation zur zirkulären Wertschöpfung gelingen kann, Ergebnisse und Empfehlungen des VDI-Round Table, Brennecke, V., Festidis, B. u. Freimuth, N., Düsseldorf 2021

-
- [20] Destatis Statistisches Bundesamt: Statistik 32111 Erhebung der Abfallentsorgung. https://www-genesis.destatis.de/genesis/online?sequenz=-statistikTabellen&selectionname=32111*#abreadcrumb, abgerufen am: 10.5.22
- [21] Stoffstromorientierte Ermittlung des Beitrags der Sekundärrohstoffwirtschaft zur Schonung von Primärrohstoffen und Steigerung der Ressourcenproduktivität, Abschlussbericht. Texte 34/2019, Steger, S. u. Ritthoff, M., Dessau-Roßlau 2019
- [22] Evaluierung unter Realbedingungen von thermisch-chemischen Depolymerisationstechnologien (Zersetzungsverfahren) zur Verwertung von Kunststoffabfällen, Beauftragt und fachlich begleitet von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt. Ressourcen-Technologie und Management, Seitz, M., Cepus, V., Klätte, M., Thamm, D. u. Pohl, M., Stuttgart 2020
- [23] cyclos-HTP: Publikationen. Artikel und Studien, Vorträge und Pressemitteilungen, 2022. <https://www.cyclos-http.de/publikationen/>, abgerufen am: 02.05.2022
- [24] Joachim Christiani u. Sandra Beckamp: Was können die mechanische Aufbereitung von Kunststoffen und das werkstoffliche Recycling leisten? In: Thiel, S., Thomé-Kozmiensky, E., Quicker, P. u. Gosten, A. (Hrsg.): Energie aus Abfall. Neuruppin: Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH 2020
- [25] Stoffstromorientierte Lösungsansätze für eine hochwertige Verwertung von gemischten gewerblichen Siedlungsabfällen. Texte 18/2015, I. Dehne, R. Oetjen-Dehne, N. Siegmund, Dessau-Roßlau 2015
- [26] Technische Potenzialanalyse zur Steigerung des Kunststoffrecyclings und des Rezyklateinsatzes. Texte 92/2021, Knappe, F., Reinhardt, J., Kauertz, B., Oetjen-Dehne, R., Buschoff, N., Ritthoff, M., Wilts, H. u. Lehmann, M., Dessau-Roßlau 2021
- [27] Der Grüne Punkt: Downloads. Infos für Lieferanten: Spezifikationen, 2020. <https://www.gruener-punkt.de/de/downloads.html>, abgerufen am: 24.11.2020

-
- [28] Aufkommen und Verwertung von PET-Getränkeflaschen in Deutschland 2019, Kurzfassung, gvm Gesellschaft für Verpackungsmarktforschung, Mainz 2020
 - [29] Kunststofffenster-Recycling in Zahlen 2020, Rewindo GmbH, Berlin 2020
 - [30] Reporting on 2020 Activities. And Summarising the Key Achievements of the past 10 Years, Vinylplus, Brüssel 2021
 - [31] Seier, M.: Herausforderungen im mechanischen Recycling von Einweg-Kunststoffen und Möglichkeiten neuer Konzepte. Kurzvortrag. Polymertec. Hochschulcampus Merseburg 2021
 - [32] Kunststoffweb: Barlog: Nachhaltige technische Kunststoffteile aus recyceltem PET, 2020. https://www.kunststoffweb.de/technologie-news/barlog_nachhaltige_technische_kunststoffteile_aus_recyceltem_pet_tn103153, abgerufen am: 12.04.2022
 - [33] Biron, M.: EcoDesign. In: Material Selection for Thermoplastic Parts. Elsevier 2016, S. 603–653
 - [34] Chemical Recycling of Plastics Waste (PVC and other resins), Assignor: European Commission, DGIII. TNO-Report STB-99-55 Final, Tukker, A., Groot, H. de, Simons, L. u. Wiegiersma, S., Delft 1999
 - [35] Vollmer, I., Jenks, M. J. F., Roelands, M. C. P., White, R. J., van Harmelen, T., Wild, P. de, van der Laan, G. P., Meirer, F., Keurentjes, J. T. F. u. Weckhuysen, B. M.: Beyond Mechanical Recycling: Giving New Life to Plastic Waste. Angewandte Chemie (International ed. in English) 59 (2020) 36, S. 15402–15423
 - [36] Flamme, S., Hanewinkel, J., Quicker, P. u. Weber, K.: Energieerzeugung aus Abfällen. Stand und Potenziale in Deutschland bis 2030. Texte 51/2018, 2018. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2018-06-26_texte_51-2018_energieerzeugung-abfaelle.pdf, abgerufen am: 14.05.2022
 - [37] Koalitionsvertrag 2021–2025: Eine geeignete Grundlage für Circular Economy? Erschienen im EU-Recycling-Magazin 01/2022, S. 6, 2022. <https://eu-recycling.com/Archive/33896>, abgerufen am: 14.05.2022

-
- [38] Anmerkungen des NABU Bundesverband zum Entwurf einer Novelle des Kreislaufwirtschaftsgesetzes, Bax, V., Istel, K., Jedelhauser, M. u. Roth, S., 2020
 - [39] bvse Bundesverband Sekundärrohstoffe und Entsorgung e. V.: KRWG Vom Bundeskabinett verabschiedet, 2020. <https://www.bvse.de/recycling/recycling-nachrichten/5462-krwg-vom-bundeskabinett-verabschiedet.html>, abgerufen am: 14.05.2022
 - [40] Beschaffung von Kunststoffprodukten aus Post-Consumer-Rezyklaten. Handreichung für den öffentlichen Einkauf. Texte 130/2021, Müller, R., Wiesemann, E., Hermann, A., Dieroff, J., Betz, J. u. Bulach, W., Dessau-Roßlau 2021
 - [41] Kreislaufwirtschaft – Die Weichen Richtig Stellen. Stellungnahme des Verbraucherzentrale Bundesverbands e. V. (vzbv) zum Referentenentwurf eines Gesetzes zur Umsetzung der Abfallrahmenrichtlinie der Europäischen Union, Berlin 2019
 - [42] Ökologische Verbrauchsteuer zur umweltfreundlichen Lenkung des Getränkeverpackungsmarktes. Studie zum ökologischen Nutzen und zur rechtlichen Machbarkeit für den NABU (Naturschutzbund Deutschland) e.V, Gsell, M., Dehoust, G., Keimeyer, F., Möck, A. u. Klinski, S., Berlin 2022
 - [43] Periyasamy, A. P. u. Militky, J.: LCA (Life Cycle Assessment) on Recycled Polyester. In: Environmental Footprints of Recycled Polyester. Springer, Singapore 2020, S. 1–30
 - [44] Vom Umweltnutzen des PET-Recyclings. Unter Berücksichtigung des mehrfachen Recyclings, Dinkel, F. u. Kägi, T., Basel 2018
 - [45] bvse Bundesverband Sekundärrohstoffe und Entsorgung e. V.: Neuer DIN-Standard für Kunststoffrezyklate zur Kommentierung veröffentlicht, 2021. <https://www.bvse.de/gut-informiert-kunststoffrecycling/nachrichten-recycling/7242-neuer-din-standard-fuer-kunststoff-rezyklate-zur-komentierung-veroeffentlicht.html>, abgerufen am: 05.05.2022

-
- [46] Circleback: Deine leere Shampooflasche ist bares Geld wert! Unternehmensseite. <https://www.circleback.works/>, abgerufen am: 14.05.2022
- [47] Chemisches Recycling von Verpackungen aus Kunststoff ist keine werkstoffliche Verwertung. EUWID Recycling und Entsorgung (2018) 42/2018, S. 25
- [48] bvse Bundesverband Sekundärrohstoffe und Entsorgung e. V.: Produktverantwortung 2.0 für Verpackungen in Onlinehandel und To-Go-Konsum, 2022. <https://www.bvse.de/recycling/recycling-nachrichten/8621-produktverantwortung-2-0-fuer-verpackungen-in-onlinehandel-und-to-go-konsum.html>, abgerufen am: 14.05.2022
- [49] German Zero: Kapitel 3. Industrie. 1,5-Grad-Gesetzpaket, o. J. <https://www.germanzero.de/media/pages/assets/653dcb0292-1647511336/gz-gesetzespaket-kap3-industrie.pdf>, abgerufen am: 14.05.2022
- [50] Die „Plastiksteuer“ 2022, 2022. <https://www.verpackungsgesetz.com/themen/die-plastiksteuer-2022/>, abgerufen am: 17.05.2022
- [51] Verbändebündnis fordert: Für Müllflut verantwortliche Unternehmen müssen Plastiksteuer zahlen, nicht Steuerzahlerinnen und Steuerzahler. 2021
- [52] Haushaltsrechtliche Aspekte der Zweckbindung von Steuereinnahmen. Sachstand WD 4 - 3000 - 152/19, Deutscher Bundestag, Wissenschaftliche Dienste, Berlin 2019
- [53] PlasticsEurope: Koalitionsvertrag der „Ampel“-Koalitionäre. Eine Pressemitteilung der Initiative „Wir sind Kunststoff“. 2021
- [54] Mindeststandard für die Bemessung der Recyclingfähigkeit von systembeteiligungspflichtigen Verpackungen gemäß § 21 Abs. 3 VerpackG, Stiftung Zentrale Stelle Verpackungsregister, Osnabrück 2019
- [55] Das Verpackungsgesetz muss weiterentwickelt werden. <https://www.bvse.de/sachverstand-bvse-recycling/themen-ereignisse/7720-das-verpackungsgesetz-muss-weiter-entwickelt-werden.html>, abgerufen am: 04.05.2022

-
- [56] Ermittlung der Praxis der Sortierung und Verwertung von Verpackungen im Sinne des § 21 VerpackG, Endbericht. Texte 11/2021, Dehoust, G., Hermann, A., Christiani, J., Bartnik, S., Beckamp, S. u. Bünemann, A., Dessau-Roßlau 2021
- [57] Deutsche Umwelthilfe: Chemisches Recycling. <https://www.duh.de/projekte/chemisches-recycling/>, abgerufen am: 17.05.2022
- [58] Roth, S.: Chemisches Recycling von Kunststoffen – Potenziale, Risiken und viele offene Fragen, Berlin o. J. https://www.nabu.de/imperia/md/content/nabude/abfallpolitik/200812_nabu_roth_chemisches_recycling.pdf, abgerufen am: 11.05.2022
- [59] Geschäftsbericht 2020, PlasticsEurope Deutschland e. V., Frankfurt a. M. 2021
- [60] Verwendung und Recycling von PET in Deutschland. Verwendung von PET und PET Rezyklaten aus Verpackungen in Deutschland Eine Kurzstudie im Auftrag des NABU – Naturschutzbund Deutschland e. V., Kauertz, B. u. Detzel, A., Heidelberg 2017
- [61] Lindner, C. u. Hoffmann, O.: Analyse/Beschreibung der derzeitigen Situation der stofflichen und energetischen Verwertung von Kunststoffabfällen in Deutschland. Endbericht, 2015. <https://www.itad.de/information/studien/ITADConsulticKunststoffstudieApril2015.pdf>, abgerufen am: 29.10.2019
- [62] Biobasierte Kunststoffe als Verpackung von Lebensmitteln, Andreas Detzel, Florian Bodrogi, Benedikt Kauertz, Carola Bick, Frank Welle, Markus Schmid, Kevin Schmitz, Kerstin Müller u. Harald Käß, Heidelberg, Freising, Berlin 2018
- [63] Die europäische Verpackungsindustrie 2025. Trends, Perspektiven und Erfolgsfaktoren in einem kompetitiven Marktumfeld, Kopp, C., Sauter, R., Schentler, P., Weber, C. u. Bergmann, M., Wien, Österreich 2021
- [64] DishCircle. Das Mehrwegsystem für die Gastronomie. <https://www.dishcircle.com>, abgerufen am: 17.05.2022
- [65] Recup: Essen und Getränke zum Mitnehmen – ohne Einwegmüll. <https://recup.de>, abgerufen am: 17.05.2022

-
- [66] Kuchta, K.: Kunststoffabfälle aus privaten Haushalten erfassen, sortieren und verwerten. *Wasser und Abfall* 21 (2019) 1–2, S. 17–22
 - [67] KuRVe (Kunststoff Recycling und Verwertung). Ökonomisch-ökologische Analyse von Sammel und Verwertungssystemen von Kunststoffen aus Haushalten in der Schweiz, Kurzbericht, Dinkel, F., Kägi, T., Bunge, R., Pohl, T. u. Stäubli, A., 2017
 - [68] Umweltbundesamt: Entwicklung der Verwertung der Kunststoffabfälle, 2020. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/384/bilder/2_abb_verwertung-kunststoffabfaelle_2021-01-11.png, abgerufen am: 17.05.2022
 - [69] Limberger, S., Dittrich, M., Jedelhauser, M. u. Roth, S.: Sekundärrohstoffe in Deutschland. Status Quo, Steigerungspotenziale und regulative Instrumente. *Müll und Abfall* (2021) 10, S. 536–543
 - [70] o. A.: BUND fordert strengere Regeln für Recycling von schadstoffhaltigen Kunststoffabfällen. Studie weist bromierte Dioxine in Plastikspielzeug nach. *Euwid* (2018) 48.2018, S. 3
 - [71] Substitutionsquote – Ein realistischer Erfolgsmaßstab für die Kreislaufwirtschaft! Position der Ressourcenkommission am Umweltbundesamt (KRU), Ressourcenkommission am Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau 2019
 - [72] Wagner, J., Günther, M., Rhein, H.-B. u. Meyer, P.: Analyse der Effizienz und Vorschläge zur Optimierung von Sammelsystemen der haushaltsnahen Erfassung von Leichtverpackungen und stoffgleichen Nichtverpackungen auf der Grundlage vorhandener Daten. *TEXTE* 37/2018. Abschlussbericht, 2018. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2018-05-22_texte_37-2018_sammelsysteme-verpackungen.pdf, abgerufen am: 20.01.2020
 - [73] Bericht Module 3 + 4 Verwertung Kunststoffabfälle Schweiz im Auftrag des Runden Tisches Kunststoff unter der Leitung des BAFU mit Stellungnahmen der Mitglieder des Projektausschusses Runder Tisch Kunststoff, Seyler, C. u. Sommerhalder, Markus, Wolfensberger, Maya, Bern 2016

-
- [74] Verpackungen im Fokus. Die Rolle von Circular Economy auf dem Weg zu mehr Nachhaltigkeit, Bovensiepen, G., Fink, H., Schnück, P., Rumpff, S. u. Raimund, S., 2018
 - [75] ARD: Fast jeder Zweite muss sich einschränken. Monatlicher ARD-Deutschland-Trend Mai 2022. <https://www.tagesschau.de/inland/deutschlandtrend/deutschlandtrend-3037.html>, abgerufen am: 03.06.2022
 - [76] Carolina E. Schweig: Wirtschaftliche Nachhaltigkeit für Packstoff, Packmittel und deren Herstellungs- und Wiederwertungsprozesse: Individualisiert, ganzheitlich und funktionsübergreifend die zukunfts-fähige Verbindung von Markenführung, Costsaving, Engineering, soziale Verantwortung. In: Deckert, C. (Hrsg.): CSR und Logistik. Spannungsfelder Green Logistics und City-Logistik. Corporate Social Responsibility. Berlin: Springer Gabler 2021, S. 197–223
 - [77] Pfandsysteme in Österreich. Die Zeit ist reif für ein Einweg-Pfand-system in Österreich – in Kombination mit verpflichtenden Mehrweg-Quoten! <https://www.global2000.at/pfandsystem-oesterreich>, abge-rufen am: 02.05.2022
 - [78] Wertstoffhöfe, gelber Sack und Wertstofftonne. Eine Ökoeffizienz- und Akzeptanzanalyse für Bayern am Beispiel Zweckverband für Abfall-wirtschaft, Kempten. Bifa-Text, Nr. 55. Augsburg: Bifa-Umweltinst 2011
 - [79] Pfandsysteme im internationalen Vergleich/Pfandsystem FAQ. <https://www.deposy.org/pfandsystem/>, abgerufen am: 11.05.2022
 - [80] DIN EN 13427:2004-10. Verpackung – Anforderungen an die Anwen-dung der Europäischen Normen zu Verpackungen und Verpackungs-abfällen. Deutsche Fassung
 - [81] Umgang mit Verpackungen in Europa. Eine Übersicht der nationalen Umsetzung, Deutscher Industrie- und Handelskammertag e. V., 2020
 - [82] PRO Europe: Who we are, 2022, abgerufen am: 06.05.2022

-
- [83] PRO Europe: Über uns, o. J. <https://www.pro-e.org/about-us>, abgerufen am: 24.04.2022
- [84] Prüfung und Aktualisierung der Ökobilanzen für Getränkeverpackungen. Texte 19/2016, Detzel, A., Kauertz, B., Grahl, B. u. Heinisch, J., Dessau-Roßlau 2016
- [85] Grundlagenartikel. <https://www.kunststoffe.de/a/grundlagenartikel/be-griffsdefinitionen-fuer-das-werkstoffl-285262>, abgerufen am: 08.05.2022
- [86] APK AG: Unternehmenswebsite. <https://www.apk-ag.de/>, abgerufen am: 16.05.2022
- [87] Coperion: Geruchsentfernung beim Recycling von Kunststoffen. <https://www.coperion.com/de/industrien/kunststoff-recycling/kunststoff-recycling-geruchsentfernung>, abgerufen am: 16.05.2022
- [88] Starlinger: Geruchsentfernung. <https://www.starlinger.com/de/recycling/anwendungen/geruchsentfernung/>, abgerufen am: 16.05.2022
- [89] Fraunhofer-Institut für Verfahrenstechnik und Verpackung IVV: Charakterisierung und Optimierung von Geruch in Kunststoffen und Rezyklaten. <https://www.ivv.fraunhofer.de/de/produktwicklung/geruchsoptimierung/kunststoffrezyklate.html>, abgerufen am: 13.05.2022
- [90] Was können die mechanische Aufbereitung von Kunststoffen und das werkstoffliche Recycling leisten? Energie aus Abfall Band 17, Christiani, J. u. Beckamp, S., Neuruppin 2020
- [91] Separation AG. Unternehmenssite. <https://separation.group/f-e.html>, abgerufen am: 17.05.2022
- [92] Steinert: Schwarze Kunststoffe. <https://steinertglobal.com/de/abfall-recycling/schwarze-kunststoffe/>, abgerufen am: 17.05.2022
- [93] Fraunhofer-Institut für Verfahrenstechnik und Verpackung IVV: PET-Rezyklat aus Post-Consumer-Abfällen, o. J. <https://www.ivv.fraunhofer.de/de/recycling-umwelt/recycling-von-verpackungen/pet-recycling.html>, abgerufen am: 10.05.2022

-
- [94] Quicker, P., Seitz, M. u. Vogel, J.: Chemical recycling: A critical assessment of potenziel process approaches. Waste management & research: the journal of the International Solid Wastes and Public Cleansing Association, ISWA (2022), 734242X221084044
 - [95] RecyclingPortal: Polyamid-6-Werkstoffe: Meeresabfälle durch Depolymerisation zu Nylon, 2016. <https://recyclingportal.eu/Archive/27888>, abgerufen am: 26.05.2020
 - [96] Kusenberg, M., Zayoud, A., Roosen, M., Thi, H. D., Abbas-Abadi, M. S., Eschenbacher, A., Kresovic, U., Meester, S. de u. van Geem, K. M.: A comprehensive experimental investigation of plastic waste pyrolysis oil quality and its dependence on the plastic waste composition. Fuel Processing Technology 227 (2022), S. 107090
 - [97] Wikimedia: Technology Readiness Level, 2021. https://de.wikipedia.org/wiki/Technology_Readiness_Level, abgerufen am: 06.05.2022
 - [98] HolyGrail: tagging packaging for accurate sorting and high-quality recycling. <https://emf.thirdlight.com/link/m3y1p3woy7j1-aipyq/@/preview/1?o>, abgerufen am: 12.05.2022
 - [99] Solis, M. u. Silveira, S.: Technologies for chemical recycling of household plastics – A technical review and TRL assessment. Waste management (New York, N.Y.) 105 (2020), S. 128–138
 - [100] Müllpyrolyse Anlage Burgau, Gerlach, D., 2009
 - [101] 320° Deutschlands Online-Magazin für die Recyclingwirtschaft: Müllpyrolyseanlage Burgau wird stillgelegt. Die Kosten für die Anlage sind zu hoch, begründet der Landkreis Günzburg die Maßnahme. Die Mitarbeiter können dennoch auf Weiterbeschäftigung hoffen, 2014. <https://320grad.de/2014/10/14/muellpyrolyseanlage-burgau-wird-stillgelegt/>, abgerufen am: 06.05.2022
 - [102] Thermal Processes for Feedstock Recycling of Plastics Wast. Study, KIT Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe 2019
 - [103] RECENSO GmbH: Chemisches Recycling, 2022. <https://www.recenso.eu/de/chemisches-recycling.html>, abgerufen am: 05.05.2022

-
- [104] Biofabrik: Decentralized Plastic Recycling, o. J. <https://biofabrik.com/de/wastx-plastic/>, abgerufen am: 05.05.2022
- [105] Mey, S.: Kopf-Syngas-Klärschlammvergasung. Kraftwerk für die Kläranlage und saubere Klärschlammasche für die Phosphorrückgewinnung. In: Sauermann, U. u. Klätte, M. (Hrsg.): Thermolyphos. Dokumentationsband zur Forumsveranstaltung am 4. und 5. Oktober 2016 in Halle (Saale). Ressourcen-Technologie und Management. Stuttgart: Steinbeis-Edition 2017, S. 33–46
- [106] Spektrum: Lurgi-Verfahren. Lexikon der Physik, o. J. <https://www.spektrum.de/lexikon/physik/lurgi-verfahren/9236>, abgerufen am: 05.05.2022
- [107] Evaluation of pyrolysis with LCA – 3 case studies, Russ, M., Conzalez, M. u. Horlacher, M., Ludwigshafen 2020
- [108] LCA of Management Options for Mixed Waste Plastics Technical report templates. Final Report, The Waste and Ressource Action Programme, 2008
- [109] Volk, R., Stallkamp, C., Steins, J. J., Yogish, S. P., Müller, R. C., Stapf, D. u. Schultmann, F.: Techno-economic assessment and comparison of different plastic recycling pathways: A German case study. *Journal of Industrial Ecology* 25 (2021) 5, S. 1318–1337
- [110] Keller, F., Lee, R. P. u. Meyer, B.: Life cycle assessment of global warming potenzial, resource depletion and acidification potenzial of fossil, renewable and secondary feedstock for olefin production in Germany. *Journal of Cleaner Production* 250 (2020), S. 119484
- [111] Declaration of the Circular Plastics Alliance. <https://ec.europa.eu/docsroom/documents/36361>, abgerufen am: 17.05.2022
- [112] Evaluation der gemischten Kunststoffsammlung im Unteren Fricktal, Heim, Thomas, Strassburg, Joris, 2019
- [113] Bunge, R.: Kunststoffrecycling lohnt sich nicht. In: Thiel, S., Holm, O., Thomé-Kozmiensky, E., Goldmann, D. u. Friedrich, B. (Hrsg.): Recycling und Rohstoffe. Neuruppin: TK Thomé-Kozmiensky Verlag 2019, S. 245–258

-
- [114] 320° Deutschlands Online-Magazin für die Recyclingwirtschaft: Jedes Jahr 60 neue MVA. Der weltweite Abfallverbrennungsmarkt ist weiter aufwärts gerichtet. Das Wachstum findet vor allem in Asien statt. In Europa hingegen gibt es nur vereinzelte Anzeichen einer Marktbelebung. Marktprognose, 2018. <https://320grad.de/2018/02/28/jedes-jahr-60-neue-mva/>, abgerufen am: 05.05.2022
 - [115] Entwicklung von Instrumenten und Maßnahmen zur Steigerung des Einsatzes von Sekundärrohstoffen – mit Schwerpunkt Sekundärkunststoffe. Texte 65/2016, Wilts, H., Gries, N. von, Dehne, I., Oetjen-Dehne, R., Buschow, N. u. Sanden, J., Dessau-Roßlau 2016
 - [116] AGVU Arbeitsgemeinschaft Verpackung und Umwelt: Empfehlungen zur Eco-Fee-Modulierung. Europäische Leitlinien, o. J. <https://www.agvu.de/de/empfehlungen-zur-eco-fee-modulierung-1737/>, abgerufen am: 08.05.2022
 - [117] Schwarz-Gruppe: Klartext reden. Nachhaltig handeln. Fortschritte zeigen. Der Fortschrittsbericht zu den Nachhaltigkeitsaktivitäten der Schwarz Gruppe im Geschäftsjahr 2020, 2021. <https://gruppe.schwarz/assets/csr/fortschrittsbericht/#0>, abgerufen am: 26.04.2022
 - [118] Sachstand zu den alternativen Verfahren für die thermische Entsorgung von Abfällen. Texte 17/2017, Qicker, P., Neuerburg, F., Noel, Y. u. Huras, A., Dessau-Roßlau 2017
 - [119] Prüfung und Testierung der Recyclingfähigkeit. Anforderungs- und Bewertungskatalog des Institutes cyclos – HTP, Christiani, J. e. a., Aachen 2017
 - [120] Promoting the high-quality recycling of plastics from demolition waste and enhancing the use of recycled materials in construction products in accordance with the European Plastics Strategy. Texte 152/2021, Phillip Bendix, Holger Berg, János Sebestyén, Michael Ritthoff, Laura Perschel, Daniela Eckert, Robin Kocina u. Hermann Achenbach, 2021
 - [121] Christiani, J.: Der grüne Punkt – keine Angst vor Rezyclaten. Online-Veranstaltung des Grünen Punkts mit wertvollen Insights in die Welt der Post-Consumer-Kunststoffrezyklate. Aachen 2021

-
- [122] Funktionen der Verpackung. <https://www.tis-gdv.de/tis/verpack/funktion/funktion-htm/>, abgerufen am: 14.05.2022
- [123] Der runde Tisch Eco Design von Kunststoffverpackungen: Anwendung des Leitfadens. <https://ecodesign-packaging.org/leitfaden/anwendung-des-eco-design-leitfadens/>, abgerufen am: 11.05.2022
- [124] CO₂-Fußabdruck und weitere Umweltwirkungen von Gemüse aus Baden-Württemberg, Endbericht, Müller-Lindenlauf, M., Zipfel, G., Rettenmaier, N., Gärtner, S., Münch, J., Paulsch, D. u. Reinhardt, G., Heidelberg 2013
- [125] RecyClass: the future of plastic is circular! We support the industry in redesigning plastic products to improve quality at the end of their life & promote transparent use of recycled plastics in high value products. <https://recyclclass.eu>, abgerufen am: 14.05.2022
- [126] Kunststoff-Rezyklateinsatz in Europa: Digitale Monitoring-Plattform MORE gestartet, 2019. <https://newsroom.kunststoffverpackungen.de/2019/04/29/kunststoff-rezyklateinsatz-in-europa-digitale-monitoring-plattform-more-gestartet/>, abgerufen am: 14.05.2022
- [127] Liste der für eine Zulassung in Frage kommenden besonders besorgniserregenden Stoffe. (veröffentlicht gemäß Artikel 59 Absatz 10 der REACH-Verordnung). <https://echa.europa.eu/de/candidate-list-table>, abgerufen am: 02.05.2022
- [128] VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH: Digitaler Produktpass als Enabler der Kreislaufwirtschaft, Frankfurt a. M 2022. <https://www.neress.de/termine/termin/4747-digitaler-produktpass-als-enabler-der-kreislaufwirtschaft/>, abgerufen am: 17.05.2022
- [129] Guidelines on submission of a dossier for safety evaluation by the EFSA of a recycling process to produce recycled plastics intended to be used for manufacture of materials and articles in contact with food – Opinion of the Scientific Panel on food additives, flavourings, processing aids and materials in contact with food (AFC). EFSA Journal 6 (2008) 7

-
- [130] Scientific Opinion on the criteria to be used for safety evaluation of a mechanical recycling process to produce recycled PET intended to be used for manufacture of materials and articles in contact with food. EFSA Panel on food contact materials, enzymes, flavourings and processing aids (CEF). EFSA Journal 9 (2011) 7
 - [131] Verband der Chemischen Industrie e. V.: Forschungspolitische Empfehlungen zum chemischen Kunststoffrecycling. Frankfurt a. M. 2021
 - [132] Chemisches Recycling. Hintergrundpapier, Vogel, J., Krüger, F. u. Fabian, M., Dessau-Roßlau 2020
 - [133] Langer, B., Seitz, M., Sauermann, U. u. Klätte, M.: Hemnisse im Rezyklateinsatz: Interview und Diskussion mit ALPLA, Microsoft TEAMS 2022
 - [134] K-Zeitung Online: Mit PET-Recycling zum geschlossenen Kunststoffkreislauf, 2020. <https://www.k-zeitung.de/mit-pet-recycling-zum-geschlossenen-kunststoffkreislauf/>, abgerufen am: 08.04.2022
 - [135] Der Modeboom bei recyceltem Plastik hat seinen Preis, 2021. <https://germanic.news/der-modeboom-bei-recyceltem-plastik-hat-seinen-preis/>, abgerufen am: 03.05.2022
 - [136] Wikimedia: Duales System Deutschland. https://de.wikipedia.org/wiki/Duales_System_Deutschland, abgerufen am: 03.05.2022
 - [137] Heinrich Böll Stiftung Kommunalwiki: Rekommunalisierung, o. J. <https://kommunalwiki.boell.de/index.php/Rekommunalisierung>, abgerufen am: 05.05.2022
 - [138] Rekommunalisierung in der Abfallwirtschaft. Potenziale, Herausforderungen, Strategien, Vorstellung der Studie, trent:research Institut für Trend- und Marktforschung, Bremen 2014
 - [139] NABU: Das Geschäft mit dem Einwegpfand. Wie Abfüller und Handel am Pfand verdienen. <https://www.nabu.de/umwelt-und-ressourcen/ressourcenschonung/einzelhandel-und-umwelt/mehrweg/21967.html>, abgerufen am: 03.05.2022

-
- [140] Deutsche Umwelthilfe: Recycling-Lüge bei Getränkekartons: Deutsche Umwelthilfe fordert Pfand für klimaschädliche Einwegverpackung von Tetra Pak und Co. Berlin 2021
- [141] Mieth, A., Hoekstra, E. u. Simoneau, C.: Guidance for polymers the identification of in multilayer films used in food contact materials. EUR 27816 EN 1. <https://ec.europa.eu/jrc>, abgerufen am: 14.05.2022
- [142] Pötschacher, S.: Die Wertstofftonne im Vergleich zur getrennten Sammlung, Universität für Bodenkultur Masterarbeit. Wien, Österreich Jänner 2016
- [143] Welle, F.: Sauberer als vorher. Recycling von Kunststoffmaterialien in Kontakt mit Lebensmitteln. *Plastverarbeiter* (2008) September, S. 62–64
- [144] PET to PET Recycling Österreich GmbH: Bottle-to_Bottle. <https://www.pet2pet.at/de>, abgerufen am: 11.05.2022
- [145] Verein PRS PET-Recycling: Das PET-Kreislauf-Game, Zürich o. J. <https://www.petrecycling.ch/de/home>, abgerufen am: 11.05.2022
- [146] *Plastverarbeiter*: IPH eröffnet Labor für additives Kunststoffrecycling. Forschung und Entwicklung für die Kreislaufwirtschaft, 2021. <https://www.plastverarbeiter.de/verarbeitungsverfahren/iph-eroeffnet-labor-fuer-additives-kunststoffrecycling.html>, abgerufen am: 12.05.2022
- [147] Bauteile aus Recyclingkunststoff für Spülmaschinen. *Forschung Kompakt*, Zeidler-Finsel, A., Darmstadt 2022
- [148] Auerbach, M.: Untersuchung des Einflusses des Recyclings auf die Werkstoffeigenschaften von Polyethylenterephthalat (PET)., HoMe Hochschule Merseburg Bachelorarbeit. Merseburg 2014
- [149] K-Zeitung Online: PET-Verpackungen auf gutem Weg zur Kreislaufwirtschaft, 2022. <https://www.k-zeitung.de/pet-verpackungen-auf-gutem-weg-zur-kreislaufwirtschaft/>, abgerufen am: 05.04.2022
- [150] Alnatura: FAQs zu Verpackungen von Alnatura Produkten. <https://www.alnatura.de/de-de/magazin/oekologisch-sinnvolle-verpackung/faq-verpackung/alnatura-markenprodukte/>, abgerufen am: 11.05.2022

-
- [151] AMB Spa, Italia: Designed to be different. Für eine nachhaltige Welt. Der Verpackungshersteller für Komplettlösungen. Unternehmenspräsentation AMB, 2022. <https://www.ambpackaging.com/de/>, abgerufen am: 27.04.2022
 - [152] Die Auswirkungen von Kunststoffen auf Energieverbrauch und Treibhausgasemissionen in Europa, Zusammenfassender Bericht, Pilz, H., Brandt, B. u. Fehring, R., 2010
 - [153] Verpackungen für Käse. Ökologie – Abfall – Handhabung, Eine Kurzauswertung, Detzel, A., Bender, C., Ettinger, T., Schmidt, A. u. Kauter, B., Heidelberg 2021
 - [154] Life cycle assessment of supermarket carrierbags. A review of the bags available in 2006. Environment Agency science report. Bristol: Environment Agency 2011
 - [155] Ökobilanz von Tragetaschen, Hirsch, R., St. Gallen 2014
 - [156] VKU Verband kommunaler Unternehmen e. V.: VKU begrüßt konsequentes Vorgehen der EU gegen Einwegplastik. Brüssel, Berlin 2018
 - [157] bvse Bundesverband Sekundärrohstoffe und Entsorgung e. V.: Mikroplastik im Meer: Ganzes Ausmass noch immer nicht absehbar, 2022. <https://www.bvse.de/gut-informiert-kunststoffrecycling/nachrichten-recycling/8286-mikroplastik-im-meer-ganzes-ausmass-noch-immer-nicht-absehbar.html>, abgerufen am: 04.05.2022
 - [158] bvse Bundesverband Sekundärrohstoffe und Entsorgung e. V.: Chemikalienrecht ist schlechte Krücke für Abfallklassifizierung. 2017
 - [159] Treick, A., Woidasky, J. u. Lang-Koetz, C.: Object Identification Technologies as Key Enabler for Circular Business Models. Chemie Ingenieur Technik 94 (2022) 4, S. 479–492
 - [160] Beutner, C.: Ist HolyGrail 2.0 wirklich der Heilige Kreislauf-Grail?, Berlin 2021. <https://bp-consultants.de/ist-holygrail-2-0-wirklich-der-heilige-kreislauf-grail/>, abgerufen am: 05.05.2022

-
- [161] IEEE 802: Die Netzwerkstandards im Überblick. <https://www.computerweekly.com/de/feature/IEEE-802-Die-Netzwerkstandards-im-Ueberblick>
 - [162] Computerweekly: Distributed-Ledger-Technologie (DLT), 2022. <https://www.computerweekly.com/de/definition/Distributed-Ledger-Technologie-DLT>, abgerufen am: 05.05.2022
 - [163] K-Online: BASF: Additive für werkstoffliches Kunststoff-Recycling und leistungsfähige Rezyklate, Düsseldorf 2013. https://www.k-online.de/de/News/BASF_Additive_f%C3%BCr_werkstoffliches_Kunststoff-Recycling_und_leistungsf%C3%A4hige_Rezyklate, abgerufen am: 12.05.2022
 - [164] Kühnel, T.: Influence of the use of recycling materials to the processing and mechanical properties of PC/ABS materials, HoMe Hochschule Merseburg Bachelor Thesis. Merseburg 2018
 - [165] bvse Bundesverband Sekundärrohstoffe und Entsorgung e. V.: Neues EU-Forschungsprojekt Circular Foodpack untersucht leichteres Recycling für Lebensmittelverpackungen, 2021. <https://www.bvse.de/gut-informiert-kunststoffrecycling/nachrichten-recycling/7617-neues-eu-forschungsprojekt-circular-foodpack-untersucht-leichteres-recycling-fuer-lebensmittelverpackungen.html>, abgerufen am: 22.05.2022
 - [166] RUBIO – Regionales unternehmerisches Bündnis zum Aufbau von Wertschöpfungsketten für technische Biokunststoffe in Mitteldeutschland. 1. Mitteldeutscher Bioökonomie-Kongress, Hirsch, P., 2022
 - [167] Ellen MacArthur Foundation: Pioneer Projects, o. J. <https://ellenmacarthurfoundation.org/pioneer-projects>, abgerufen am: 17.05.2022
 - [168] Plastik in der Umwelt: Neuartiges Verfahren für das Kunststoffrecycling stößt auf großes Interesse der Industrie. Internationaler Workshop zur Inbetriebnahme einer Demonstrator-Anlage zum „Markerbasierten Sortier- und Recyclingsystem für Kunststoffverpackungen“ in Freiburg. 2019

-
- [169] Wiederkehr Recycling AG: Entsorgungskonzepte, Waltenschwil. <https://www.wierec.com/entsorgungskonzepte/>, abgerufen am: 17.05.2022
- [170] Neuartige Methoden entwickelt von ROTH International: Innovatives Gummi-Recycling. Neuartige Methoden entwickelt von ROTH International, o. J. <https://www.gummi-recycling-roth.de/nachhaltigkeit-gummi/innovatives-gummi-recycling>, abgerufen am: 10.05.2022
- [171] ERMAFA Sondermaschinen- und Anlagenbau GmbH: Reifen-recycling für LKW- sowie PKW-Reifen. Altreifenaufbereitung mit kryogener Feinvermahlung, Chemnitz o. J. <https://ermafa.de/reifen-recycling/>, abgerufen am: 10.05.2022
- [172] Stahl, M.: Flüssiger Stickstoff löst innigste Verbindungen. Recycling von Verbundstoffen, 2012. <https://prozesstechnik.industrie.de/chemie/fluessiger-stickstoff-loest-innigste-verbindungen/>, abgerufen am: 10.05.2022
- [173] Prezero Pyral: Pyrolyse, o. J. <https://www.prezero-pyral.com/thermische-verwertung/#Pyrolyse>, abgerufen am: 10.05.2022
- [174] Fraunhofer Cluster of Excellence Circular Plastics Economy CCPE: 2022. <https://www.fraunhofer.de/de/institute/institute-einrichtungen-deutschland/cluster-of-excellence/circular-plastics-economy.html>, abgerufen am: 06.05.2022
- [175] Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF: Neue Generation von Stabilisatoren für hochwertige Polyolefin-Rezyklate: Fraunhofer LBF und Brüggemann kooperieren. Darmstadt 2019
- [176] Pfäendner, R.: Qualitätssteigerung von Rezyklaten durch Stabilisatoren. Rezyklate erfolgreich im Markt platzieren, 2022. <https://www.lbf.fraunhofer.de/de/projekte-produkte/qualitaetssteigerung-von-rezyklaten.html>, abgerufen am: 05.05.2022

-
- [177] Dogu, O., Pelucchi, M., van de Vijver, R., van Steenberge, P. H., D'hooge, D. R., Cuoci, A., Mehl, M., Frassoldati, A., Faravelli, T. u. van Geem, K. M.: The chemistry of chemical recycling of solid plastic waste via pyrolysis and gasification: State-of-the-art, challenges, and future directions. *Progress in Energy and Combustion Science* 84 (2021), S. 100901
- [178] FONA Forschung für Nachhaltigkeit: Ressourceneffiziente Kreislaufwirtschaft – Kunststoffrecyclingtechnologien (KuRT), 2021. <https://www.fona.de/de/massnahmen/foerdermassnahmen/recycling-kunststoffe.php>, abgerufen am: 14.05.2022
- [179] Plastverarbeiter: Aktuelle Kooperationen und Projekte zum chemischen Recycling, 2021. <https://www.plastverarbeiter.de/roh-und-zusatzstoffe/aktuelle-kooperationen-und-projekte-zum-chemischen-recycling-475.html>, abgerufen am: 14.05.2022
- [180] Chemanager: TU Darmstadt koordiniert BMWi-Forschungsprojekt Verena für chemisches Recycling. Chemikalien und Strom aus Müll gewinnen, 2020. <https://www.chemanager-online.com/news/tu-darmstadt-koordiniert-bmwi-forschungsprojekt-verena-fuer-chemisches-recycling>, abgerufen am: 14.05.2022
- [181] Fraunhofer Cluster of Excellence Circular Plastics Economy CCPE: Fraunhofer CCPE veröffentlicht Positionspapier und Forschungsprogramm zum Recycling von Kunststoffen. 2021
- [182] European Chemical Industry Council. <https://cefic.org>, abgerufen am: 14.05.2022
- [183] MMAtwo: Project presentation, 2019. <https://www.mmatwo.eu/>, abgerufen am: 29.04.2022
- [184] BASF: BASF investiert in Quantafuel: Gemeinsam das chemische Recycling von Kunststoffabfällen voranbringen. 2019
- [185] bp: Next step for BP recycling technology. 2019
- [186] Puresmart. PReSmart seeks ways of transitioning from the current linear lifecycle of polyurethane (PU) products to a circular economy model. Projektpräsentation, o. J. <https://www.puresmart.eu/>, abgerufen am: 29.04.2022

-
- [187] INEOS Styrolution Group GmbH: Ineos Styrolution. Unternehmenspräsentation, o. J. <https://www.ineos-styrolution.com/index.html>, abgerufen am: 30.04.2022
- [188] BASF: BASF, QuantaFuel und REMONDIS wollen beim chemischen Recycling von Kunststoffabfällen zusammenarbeiten. 2021
- [189] Chemical recycling: Enabling plastic waste to become a valuable resource. Cefic Positions, European Chemical Industrial Council, Brüssel 2022
- [190] Wu, Y., Wang, X., Kirlikovali, K. O., Gong, X., Atilgan, A., Ma, K., Schweitzer, N. M., Gianneschi, N. C., Li, Z., Zhang, X. u. Farha, O. K.: Catalytic Degradation of Polyethylene Terephthalate Using a Phase-Transitional Zirconium-Based Metal-Organic Framework. *Angewandte Chemie International Edition* (2022), e202117528
- [191] UNE EN 13432:2001:2001-03. Requirements for Packaging Recoverable through Composting and Biodegradation. Test Scheme and Evaluation Criteria for the Final Acceptance of Packaging. <https://www.en-standard.eu/une-en-13432-2001-requirements-for-packaging-recoverable-through-composting-and-biodegradation-test-scheme-and-evaluation-criteria-for-the-final-acceptance-of-packaging/>, abgerufen am: 16.05.2022
- [192] Krieger, A.: Are bioplastics really better for the environment? Read the fine print, 2019. <https://www.greenbiz.com/article/are-bioplastics-really-better-environment-read-fine-print>, abgerufen am: 14.05.2022
- [193] Westram, H.: Bioplastik: Echte Alternativen oder neues Problem? BR Wissen, 2021. <https://www.br.de/wissen/bioplastik-echte-alternative-oder-neues-problem-100.html>, abgerufen am: 14.05.2022
- [194] Fredi, G. u. Dorigato, A.: Recycling of bioplastic waste: A review. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research* 4 (2021) 3, S. 159–177
- [195] Niaounakis, M.: Recycling of biopolymers – The patent perspective. *European Polymer Journal* 114 (2019), S. 464–475

-
- [196] Sohn, Y. J., Kim, H. T., Baritugo, K.-A., Jo, S. Y., Song, H. M., Park, S. Y., Park, S. K., Pyo, J., Cha, H. G., Kim, H., Na, J.-G., Park, C., Choi, J.-I., Joo, J. C. u. Park, S. J.: Recent Advances in Sustainable Plastic Upcycling and Biopolymers. *Biotechnology journal* 15 (2020) 6, e1900489
 - [197] Fischer, L.: Plastik fressende Sonderlinge aus Japan. Ein neu entdecktes Bakterium verdaut PET-Flaschen. Seine Evolution ist rätselhaft, seine Biochemie faszinierend, sein Nutzen fraglich. *Bio-Recycling*, 2016. <https://www.spektrum.de/news/plastik-fressende-sonderlinge-aus-japan/1402786>, abgerufen am: 14.05.2022
 - [198] Experimente zum Thema Stoffkreisläufe: Recycling/Kompostierung. Projekt: Nachhaltige Chemie im Agnes-Pockels-SchülerInnen-Labor – Neue Pädagogische Angebote zu Stoffkreisläufen und Ressourcenschonung, Mischnick, P. u. Faustmann, B., Braunschweig 2012
 - [199] Herstellertransparenz beim Einsatz von recycelten Kunststoffen. Antwort der Bundesregierung auf die Kleine Anfrage der Abgeordneten Dr. Bettina Hoffmann, Lisa Badum, Sylvia Kotting-Uhl, weiterer Abgeordneter und der Fraktion BÜNDNIS90/DIE GRÜNEN, Deutscher Bundestag, Berlin 2021
 - [200] Gütegemeinschaft Wertstoffkette PET-Getränkeverpackungen e. V.: Gütegemeinschaft PET, 2022. <https://www.wertstoff-pet.de/guetege-meinschaft-pet/>, abgerufen am: 08.03.2022
 - [201] Studie zum PET-Wertstoffkreislauf – PET-Flaschen immer umweltschonender, 2020. <https://newsroom.kunststoffverpackungen.de/2020/10/30/studie-pet-wertstoffkreislauf-pet-flaschen-umweltschonender/>, abgerufen am: 14.05.2022
 - [202] Chemie.de: Erstes Pfandsystem für Plastikverpackungen aus dem Badezimmer startet in Berlin. Startup-Idee wurde am Meer geboren, 2022. <https://www.chemie.de/news/1175763/erstes-pfandsystem-fuer-plastikverpackungen-aus-dem-badezimmer-startet-in-berlin.html>, abgerufen am: 26.04.2022

-
- [203] Werner & Mertz GmbH: Gelebte Nachhaltigkeit: Die Initiative Frosch, o. J. <https://frosch.de/Nachhaltigkeit/>, abgerufen am: 30.04.2022
- [204] Packreport: Kneipp arbeitet mit Circleback an Pilotprojekt. Die Marke Kneipp hat sich rund um die Nachhaltigkeit ihrer Verpackungen ambitionierte Ziele gesetzt., 2022. <https://www.packreport.de/news/materialien/packstoffe-packmittel-packhilfsmittel/kunststoff/Pfandsystem-fuer-Kosmetikverpackungen-Kneipp-arbeitet-mit-Circleback-an-Pilotprojekt-26756>, abgerufen am: 11.05.2022
- [205] EDEKA Ecks: Nutzen Sie die Mehrwegbox. <https://www.edeka-ecks.de/mehrwegbox/>, abgerufen am: 11.05.2022
- [206] Nachhaltigkeit. <https://www.bsk-lakufol.de/index.php/de/ueber-uns/nachhaltigkeit>, abgerufen am: 14.05.2020
- [207] Entsorgung von bunten oder transparenten PE-Folien. Angebotsseite des Unternehmens Karl-Meyer Entsorgung. <https://www.karl-meyer.de/entsorgung-gewerbe/verpackungsabfalle/folie/>, abgerufen am: 14.05.2022
- [208] Wrage, M.: Neues plastikfreies Pfandsystem bei Edeka, 2019. <https://eatsmarter.de/gesund-leben/news/neues-plastikfreies-pfandsystem-bei-edeka>, abgerufen am: 14.05.2022
- [209] Erema Group: Lebensmittelechtes Post-Consumer-Rezyklat. <https://erema-group.com/lebensmittelechtes-post-consumer-rezyklat>, abgerufen am: 14.05.2022
- [210] Edeka Südwest: Mit Mehrwegnetzen & Co. beim Einkauf Verpackungen sparen: So geht's. <https://www.zukunftleben.de/natur-schuetzen/ressourcen-schonen/so-reduzieren-sie-beim-einkauf-verpackungen/>, abgerufen am: 11.05.2022
- [211] Schader, P.: Markenprodukte in Mehrweg: Loop und die Kreislauf-Mission mit Coca-Cola, Heinz und Persil, 2021. <https://www.supermarktblog.com/2021/12/05/markenprodukte-in-mehrweg-loop-und-die-kreislauf-mission-mit-coca-cola-heinz-und-persil/>, abgerufen am: 11.05.2022

- [212] Loop: Designed for Reuse. <https://exploreloop.com/>, abgerufen am: 11.05.2022
- [213] Krause, S.: Französischer Supermarkt testet Pfandsystem für Produkte, 2019. <https://www.deutschlandfunk.de/weniger-verpackungsmuell-franzoesischer-supermarkt-testet-100.html>, abgerufen am: 11.05.2022
- [214] Packreport: Neues Pfandsystem in französischen Supermärkten, 2019. <https://www.packreport.de/news/biooekonomie/rohstoffsicherung-kreislaufwirtschaft/Carrefour-Terracycle-Neues-Pfandsystem-in-franzoesischen-Supermaerkten-13497>, abgerufen am: 11.05.2022

Anhang

Anhang 1: Best Practice: Beispiele für die Ausweitung der Pfandsysteme, insbesondere für Perspektive 3

Deutschland – Mehrwegsysteme:

- *Edeka Südwest* bietet neben den – inzwischen üblichen – Mehrwegnetzen für Obst und Gemüse auch die Möglichkeit an, eigene Mehrwegboxen mitzubringen und entsprechend selbst zu befüllen [210].
- *Edeka Ecks*: Dieser Edeka in der Nähe von Hamburg bietet eine sog. Mehrwegbox an, die die Kunden einmalig erwerben können und befüllen lassen. Die Box kann beim nächsten Einkauf in einem Sammelbehälter abgegeben werden und eine neue Box steht kostenfrei bereit [205].
- „Aktuell wird aus dem bestehenden Kreislaufsystem über den Gelben Sack zu wenig hochwertiges Rezyklat gewonnen, um daraus flächendeckend Verpackungen für die Körperpflegebranche herzustellen.“ Deshalb startet das Unternehmen *Kneipp* eine Initiative mit *Circleback*, um Rücknahmesysteme für Kosmetikprodukte zu entwickeln. Gespräche mit Drogerieketten wie *Rossmann* laufen schon [204], [46].

Auch international werden hier Wege eingeschlagen, die das Sammeln wertvoller Verpackungen durch den Inverkehrbringer im Vergleich zur Abfallentsorgung belohnen. Wenn sich die unten beschriebenen Projekte bei den britischen, amerikanischen und französischen Kunden durchsetzen, ist davon auszugehen, dass viele Markenartikler ihre Verpackungsstrategie international überdenken.

- *Loop* ist eine französische Plattform für die Wiederverwendung im Allgemeinen, aber fokussiert auf Verpackungen. Sie hilft großen Unternehmen bei der Einführung von Logistik für Mehrwegverpackungen und ist – neben Frankreich – hauptsächlich im englischen Sprachraum aktiv [212]. Einige der Aktionen dieser Plattform seien beispielhaft dargestellt:
- Die britische Tiefkühl-Supermarktkette *Iceland* kündigte vor drei Jahren an, die ersten „Reverse Vending Machines“ Großbritanniens in ihren Läden aufzustellen: Automaten, in die Kunden ihre leeren Getränkeflaschen reinschieben, konnten mit einer Gutschrift von 10 Pence rechnen [211].

- Ein händlerübergreifendes Pfandsystem kam leider nicht zustande, aber in 2022 will die Schottische Regierung eine Rücknahmeverpflichtung für Getränkedosen und -flaschen einführen [211].
- Die britische Supermarktkette *Tesco* hat sich mit seiner „Reuse-Guarantee“ festgelegt, dass Produkte in Mehrwegverpackungen nicht teurer verkauft werden, als ihr Pendant in Einwegverpackungen [211].
- Die Französische Supermarktkette *Carrefour* will bis 2025 eine 100 %ige Quote für recycelbare, wiederverwendbare oder kompostierbare Verpackungen für seine Eigenmarken erreichen und ist Gründungsmitglied von *Loop* [213], [214].
- 2019 wurde das System auch in New York (USA) gestartet [214].

Anhang 2: Rohergebnisse der Befragung

Verbesserung der Nutzung von Kunststoffzyklaten aus Verpackungen

Ziele:

- Sichtweisen zu den Hemmnissen der Erhöhung des Einsatzes von Kunststoffzyklaten in erhalten.
- Überprüfung der eigenen Überlegungen
- Sichtweisen zu möglichen Maßnahmen erfahren.

Befragte Gruppe:

- Fachleute der Unternehmen und Verbände in Deutschland
- Identitäten wurden nicht überprüft

Beginn: 07.12.2021, **Ende:** 27.01.2022

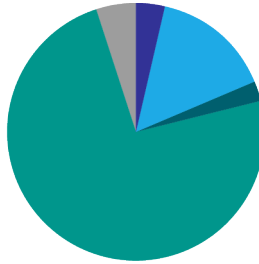
Form:

- Onlineformular
- Alle Fragen konnten übersprungen werden
- Software für Datensammlung und Ausgabe der Ergebnisse: Microsoft Forms

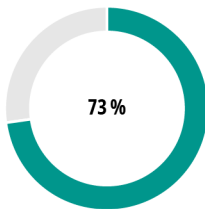
Antworten: 81

1. Welche Stufe des Kunststoffrecycling betrifft Sie am meisten?

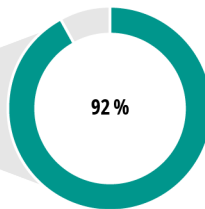
- Abfallerfassung und Sortierung (3)
- Herstellung von Rezyklaten (12)
- Händler/Vertrieb von Rezyklaten (2)
- (Potenzieller) Anwender von Rezyklaten (59)
- Sonstiges (4)



→ 73 % der „(Potenziellen) Anwender von Rezyklaten“ haben die Frage nach den Qualitätsanforderungen an Rezyklate als Rezyklate als „Hohes Hindernis“ (Frage 51) bewertet.



73 % der Personen haben „(Potenzieller) Anwender von Rezyklaten“ für Frage 1 beantwortet.



92 % von ihnen haben die Frage 51 „Hindernis Qualitätsanforderungen“ als „Hoch“ bewertet.

Antworten 1–3: Weiter mit Frage 2

Antworten 4–5: Weiter mit Frage 41

Antworten 1–3 (Abfallerfassung und Sortierung, Herstellung von Recyklaten, Händler/Vertrieb von Recyklaten)

2. Wie zufrieden sind Sie in Ihrem Unternehmen/Verband mit der aktuellen Verwertung von Kunststoffrecyklaten?

- 17 Antworten
- Durchschnittliche Bewertung: 3.00 
- 35 % bewertet zwischen „4–5“

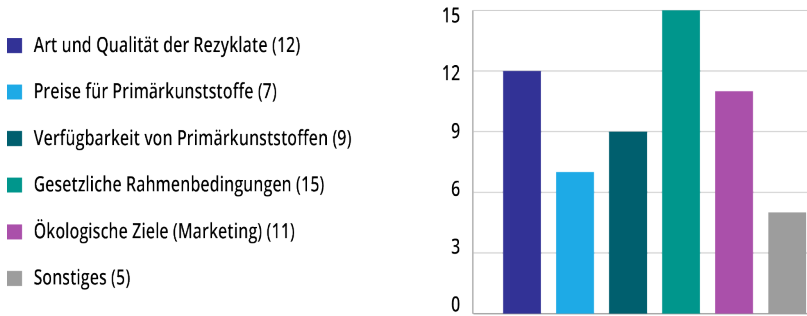
Antworten	2	3	6	5	1
					
Bewertungsergebnis	1	2	3	4	5

3. Wie schätzen Sie die Entwicklung der Nachfrage nach Kunststoffrecyklaten in den letzten 5 Jahren ein? (Unabhängig vom aktuellen Nachfrage-Boom infolge der Lieferengpässe bei Primärkunststoffen)

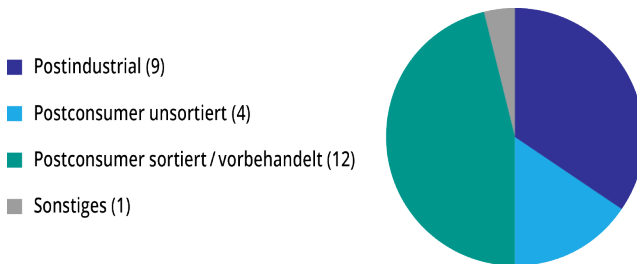
- 17 Antworten
- Durchschnittliche Anzahl: 4.00
- 71 % bewertet zwischen „4–5“

Antworten	0	2	3	5	7
					
Bewertungsergebnis	1	2	3	4	5

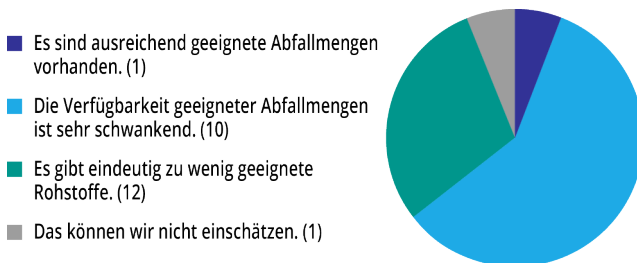
4. Wovon ist nach Ihrer Einschätzung die Nachfrage nach Kunststoff-rezyklaten hauptsächlich abhängig? (mehrere Antworten möglich)



5. Welche Art von Kunststoffabfällen verarbeiten bzw. handeln Sie? (mehrere Antworten möglich)



6. Wie schätzen Sie die Verfügbarkeit geeigneter Postconsumer-Abfälle für die Herstellung von marktfähigen Rezyklaten ein?



7. In Deutschland werden faktisch sämtliche Postconsumer-Wertstoffe aus Kunststoff gesammelt, während in anderen Ländern nur ausgewählte, höherwertige Kunststoffverpackungen angenommen werden. Wie schätzen Sie im Vergleich das deutsche Sammelsystem („Gelbe Tonne“) ein?

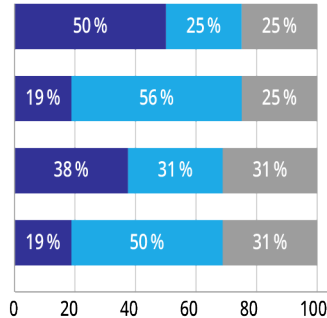
Das deutsche System ist anspruchsvoller, aber rohstoffeffizienter.

Der Sortier- und Behandlungsaufwand ist zu hoch und kann durch die Preise für Rezyklate kaum wettgemacht werden.

Die Rezyklatqualität wäre ohne Folien und Leichtverpackungen auch nicht besser.

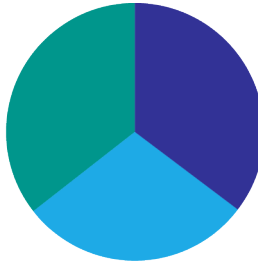
Ein Großteil der Leichtverpackungen geht nach der Sortierung ohnehin in die thermische Verwertung.

■ Ja ■ Nein ■ Kann ich nicht bewerten



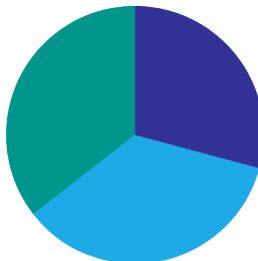
8. Sammelsysteme: Wirkung auf die Rezyklatqualität

- Verbraucher sortieren selbst vor in verschiedene Tonnen (6)
- Alles geht in eine Tonne und bessere Sortierung im Werk (5)
- Ausbau der Pfandsysteme (Vorbild: PET-Flaschen-Pfand) (6)



9. Sammelsysteme: Wirkung auf die verfügbare Rezyklatmenge

- Verbraucher sortieren selbst vor in verschiedene Tonnen (5)
- Alles geht in eine Tonne und bessere Sortierung im Werk (6)
- Ausbau der Pfandsysteme (Vorbild: PET-Flaschen-Pfand) (6)



10. Erfahrungsgemäß verbleibt nach Sortierung und Verarbeitung von Kunststoffabfällen zu Rezyklaten noch ein Produktionsrest, der überwiegend in die thermische Verwertung geht. Bitte geben Sie an, wieviel Prozent vom Input diese Produktionsreste in etwa ausmachen.

- 14 Antworten: 30 %, 40 %, 60 %, 5 %, 30 %, 20 %, 40 %, 50 %, 10 %, 35 %, 30 %, 20 %, 50 %, 10 %

Antworten	5	6	3
			
Nennungen	bis 20 %	21–40 %	41–60 %

11. Wie gut kennen Sie die Anforderungskriterien für Ihre Rezyklate?

- 17 Antworten
- Durchschnittliche Bewertung: 4.59 
- 94 % bewertet zwischen „4–5“

Antworten	0	1	0	4	12
					
Bewertungsergebnis	1	2	3	4	5

12. Wie gut kennen Sie die Anwendungen für Ihre Rezyklate?

- 17 Antworten
- Durchschnittliche Bewertung: 4.65 
- 94 % bewertet zwischen „4–5“

Antworten	0	0	1	4	12
					
Bewertungsergebnis	1	2	3	4	5

13. Nennen Sie bitte – wenn möglich – die wichtigsten typischen Anwendungsfälle für Ihre Rezyklate!

15 Antworten, u. a. (neueste Antworten):

- Non-Food-Hartverpackungen (Bsp. Shampooflaschen)
- Ergänzung Neuware; Produkte für Hoch- und Tiefbau
- Müllsäcke, Luftpolsterfolie, Verpackungsfolie für Hygieneartikel (Toipa/ Küchenrolle)
- Folien, Verpackungen, Baumaterialien (Rohre, Kabelkanäle)
- Spritzguss, Automotive, Bau-Industrie
- Verpackungen aller Art
- Müllsäcke
- Flaschen, Folientrays, Textile Fasern, Verpackungsbänder
- HDPE Tiefbauprodukte (z. B. Rohre, Wassertanks etc.), Packaging Anwendungen sind im Kommen (Paletten, Behälter etc.) PP Blumentöpfe, Pflanzschalen, PP Tiefbauprodukte (z. B. Regenrinnen, Rigolen etc.), aber auch Haushaltsartikel LDPE Bau-Eimer, Rasengitter, Müllsackherstellung,
- Herstellung von Folien
- hängt von der Art des Kunststoffs ab
- Home Care Food & Beverages Personal Care Oil & Lubricants

14. Wie schätzen Sie den technischen Stand Ihrer Sortiertechnik bzw. bei Ihren Lieferanten ein?

- 17 Antworten
- Durchschnittliche Bewertung: 3.12
- 24 % bewertet zwischen „4–5“



Antworten	1	1	11	3	1
Bewertungsergebnis	1	2	3	4	5

15. Welche Gründe hindern Sie oder Ihre Lieferanten, in leistungsfähigere Sortier- und Aufbereitungstechnik zu investieren?

12 Antworten:

- Überkapazitäten durch alte Anlagen
- Die Sortierkapazitäten in D werden zur Zeit deutlich erweitert. Ansonsten typische Hindernisse in D sind überbordende Bürokratie bei Genehmigungen und Ausbau von Anlagen – eben der bekannte Standortnachteil Deutschland.
- kein Sortierbedarf
- Unklare Rahmenbedingungen der Politik, kein einheitliches System in Europa
- Nach Aussage meiner Partner brauchen wir nicht andere Technologie, sondern Monomaterial-Verpackungen
- Preise für Rezyklat
- Rezyklaterlöse
- Gesetzliche Rahmenbedingungen wie z. B. minimum recycled plastic content.
- Das muss der Lieferant beantworten.
- Technische Herausforderungen, benötigtes Investment, Logistik
- Planungsunsicherheit: In welche Richtung gehen politische Entscheidungen? geringe Verfügbarkeit: Sammelquoten und Zugriffsbeschränkungen geringe Recyclingfähigkeit: D4R-Standards

16. Bitte nennen Sie die wichtigsten dieser rechtlichen Hemmnisse für Ihr Unternehmen/Ihren Verband.

13 Antworten:

- Genehmigungsverfahren
- Das Chemikalienrecht verhindert, dass bestimmte Stoffströme aufbereitet werden, auch wenn das Ergebnis stoffkonform wäre. Darüber hinaus sind die Chemikalienbewertungen dynamisch, so dass heute noch zulässige Substanzen immer wieder in (vollkommen unsinnige) Stoffverbote laufen, s. Titandioxid.
- Lebensmittelkonformität
- Food-Contact
- Lebensmittelrecht
- Genehmigung der Anlagen, Umweltauflagen, Energie

- unökologische Bevorzugung von Mehrwegverpackungen bei Ignoranz bestehender Ökobilanzen
- veraltete DIN-Normen und überzogene Anforderungen an mechanische Eigenschaften
- Vorgaben hinsichtlich Migration von Störstoffen
- die rechtlichen Anforderungen für einige Anwendungen sollten überprüft werden
- Die fehlende Anerkennung der Verfahren des chemischen und physikalischen Recyclings.
- Mangel rechtlicher Zulassungen für den Einsatz von Rezyklaten in Lebensmittelverpackungen

17. Allgemein: Welche hemmenden rechtlichen Rahmenbedingungen könnten aus Ihrer Sicht ohne Abstriche am Verbraucher- und Umweltschutz entschärft oder gänzlich abgeschafft werden?

9 Antworten:

- Reform des Stoffrechts – seine Ausweitung auf Mischungen und Erzeugnisse ist kontraproduktiv. Vereinfachen der AVV, der VVA, von ADR/RID. Gehemigungsrecht von Industriebauten muss vereinfacht werden. Vereinfachung von BImSchG mit BImSchV und TA Luft.
- Wir brauchen dringend eine FDA Zulassung für alle PE und PP Regenerate, Einsatz von zugekauftem Regenerat ist selbst durch die Gesetzgebung für Unternehmen im Bereich Lebensmittelfolienproduktion untersagt.
- Es sollten rechtliche Rahmenbedingungen geschaffen werden, die Anreize zum Rezyklateinsatz schaffen
- Es muss überhaupt nichts abgeschafft werden; die Verpackungsindustrie muss die zur Weiterverarbeitung geeignetsten Polymere einsetzen; anstelle LDPE besser PP.
- Einschränkungen bei Lebensmittelkontakt
- Es geht aus meiner Sicht nicht um entschärfen oder abschaffen, sondern um eine neue Betrachtung, eine Überprüfung und Anpassung an die aktuellen Gegebenheiten. Was ist notwendig und was ist möglich.
- Es brauchte eine rechtliche Anerkennung aller Kunststoffrecyclate, unabhängig von der Methode. Es braucht umgehend einen Stopp der Kunststoffdeponierung EU weit, des Abfallsexports EU weit, sowie eine Eingrenzung der thermischen Verwertung auf reine Energiegewinnung.

18. Erzielbare Preise

- 17 Antworten
- Durchschnittliche Bewertung: 3.12
- 35 % bewertet zwischen „4–5“



Antworten	1	4	6	4	2
					
Bewertungsergebnis	1	2	3	4	5

19. Qualitätsanforderungen

- 17 Antworten
- Durchschnittliche Bewertung: 4.00
- 76 % bewertet zwischen „4–5“



Antworten	0	1	3	8	5
					
Bewertungsergebnis	1	2	3	4	5

20. Vertragslaufzeiten mit Abnehmern

- 17 Antworten
- Durchschnittliche Bewertung: 2.82
- 24 % bewertet zwischen „4–5“



Antworten	2	4	7	4	1
					
Bewertungsergebnis	1	2	3	4	5

21. Vertragsumfang/Liefermengen

- 17 Antworten
- Durchschnittliche Bewertung: 3.29
- 35 % bewertet zwischen „4–5“



Antworten	0	3	8	4	2
Bewertungsergebnis	1	2	3	4	5

22. Weitere

3 Antworten:

- Es müssen Investitionen in Recyclinganlagen gefördert werden. Die Kapazitäten sind in vielen Bereichen nicht ausreichend.
- Rohstoffpreise
- Vertragslaufzeiten mit Lieferanten

23. Reduzierung der Umsatzsteuer auf 7 % für Rezyklate

- 16 Antworten
- Durchschnittliche Bewertung: 2.88
- 38 % bewertet zwischen „4–5“



Antworten	5	3	2	1	5
Bewertungsergebnis	1	2	3	4	5

24. Sonder-AfA bei Investitionen in moderne Sortier- und Verarbeitungstechnik

- 16 Antworten
- Durchschnittliche Bewertung: 4.25
- 81 % bewertet zwischen „4–5“



Antworten	1	1	1	3	10
Bewertungsergebnis	1	2	3	4	5

25. Förderung von Investitionen in und Beteiligungen an Unternehmen, die Rezyklate produzieren

- 16 Antworten
- Durchschnittliche Bewertung: 4.06 
- 69 % bewertet zwischen „4–5“

Antworten	1	1	3	2	9
					
Bewertungsergebnis	1	2	3	4	5

26. Vorgeschriebene Mindestquote für Rezyklateinsatz

- 16 Antworten
- Durchschnittliche Bewertung: 3.75 
- 63 % bewertet zwischen „4–5“

Antworten	1	4	1	2	8
					
Bewertungsergebnis	1	2	3	4	5

27. Vorgaben bzw. Vorteile bei öffentlicher Auftragsvergabe bei den Anwenden von Rezyklaten

- 16 Antworten
- Durchschnittliche Bewertung: 3.69 
- 63 % bewertet zwischen „4–5“

Antworten	1	3	2	4	6
					
Bewertungsergebnis	1	2	3	4	5

28. Vorgaben für kreislaforientiertes Produktdesign

- 16 Antworten
- Durchschnittliche Bewertung: 4.56 
- 88 % bewertet zwischen „4–5“

Antworten	0	1	1	2	12
					
Bewertungsergebnis	1	2	3	4	5

29. Cradle-to-Cradle-Zertifikat für Rezyklate (analog „Blauer Engel“)

- 16 Antworten
- Durchschnittliche Bewertung: 3.44 
- 50 % bewertet zwischen „4–5“

Antworten	1	2	5	5	3
					
Bewertungsergebnis	1	2	3	4	5

30. CO₂-Bepreisung auf Reststoffe für die thermische Verwertung

- 16 Antworten
- Durchschnittliche Bewertung: 3.25 
- 50 % bewertet zwischen „4–5“

Antworten	3	2	3	4	4
					
Bewertungsergebnis	1	2	3	4	5

31. Lockerung von Qualitätsanforderungen auf Kunststoffe

- 15 Antworten
- Durchschnittliche Bewertung: 2.87 
- 40 % bewertet zwischen „4–5“

Antworten	4	3	2	3	3
					
Bewertungsergebnis	1	2	3	4	5

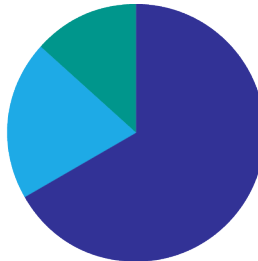
32. Weitere Anreize

2 Antworten:

- Design for Recycling, Einsatzverbot von Verbundverpackungen
- Zertifikatsmodell für Rezyklateinsatz plus CO₂-Anrechnung

33. Sie vertreten hier

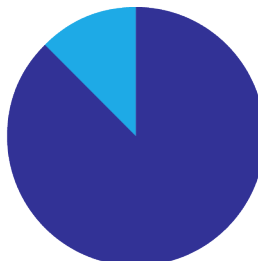
- ein Unternehmen (10)
- eine Unternehmensgruppe (3)
- einen Verband (2)
- Sonstiges (0)



34. Anzahl der Mitarbeiter (nicht veröffentlicht)

35. Wir möchten über die Ergebnisse des Gutachtens informiert werden, sofern der Bundestag eine Freigabe erteilt.

- Ja (14)
- Nein (2)



36. Erklären Sie sich für ein ergänzendes Telefongespräch im Nachgang zur Befragung bereit?



37. Ansprechpartner (nicht veröffentlicht)

38. Institution

- byse – Bundesverband Sekundärrohstoffe und Entsorgung
- Kunststoffwerk Lahr GmbH
- Maag GmbH
- SRH Kunststoffe GmbH
- Sund Group
- Reiling Kunststoff Recycling GmbH & Co. KG
- Bayern-Fass GmbH
- APK AG
- Basell Polyolefine GmbH
- Plastics Europe Deutschland e. V.
- ALPLA

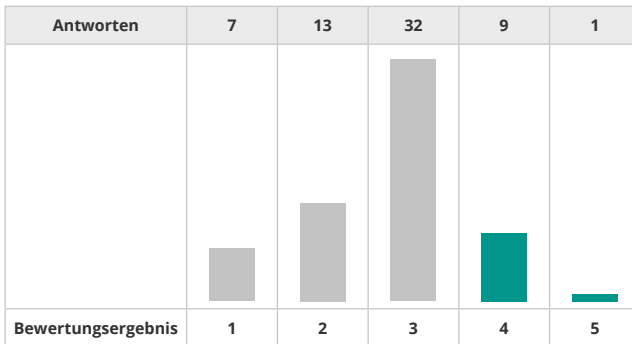
39. Telefonnummer (nicht veröffentlicht)

40. E-Mail (nicht veröffentlicht)

Weiter von Frage 1, bei Antwort 4 (*Potenzielle*) Nutzer von Rezyklaten und 5 *Sonstige*

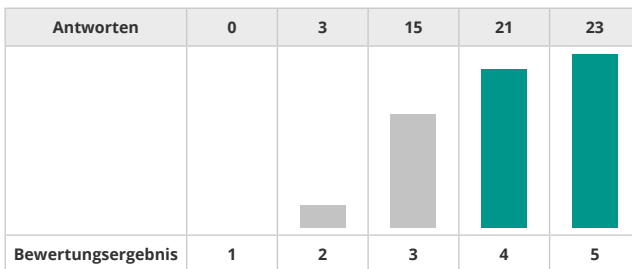
41. Wie zufrieden sind Sie in Ihrem Unternehmen/Verband mit der aktuellen Verwertung von Kunststoffrezyklaten?

- 62 Antworten
- Durchschnittliche Bewertung: 2.74 
- 16 % bewertet zwischen „4–5“

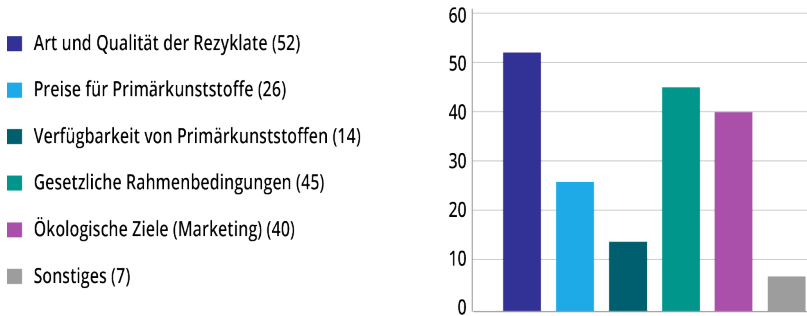


42. Wie schätzen Sie die Entwicklung der Nachfrage nach Kunststoffrezyklaten in den letzten 5 Jahren ein? (Unabhängig vom aktuellen Nachfrage-Boom infolge der Lieferengpässe bei Primärkunststoffen)

- 62 Antworten
- Durchschnittliche Anzahl: 4.03
- 71 % bewertet zwischen „4–5“



**43. Wovon ist nach Ihrer Einschätzung die Nachfrage nach Kunststoff-
rezyklaten hauptsächlich abhängig? (mehrere Antworten möglich)**

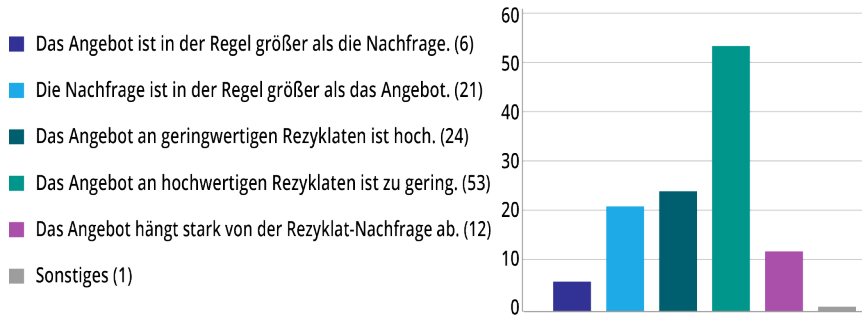


**44. Wie schätzen Sie die Entwicklung des Angebots von Kunststoffrezy-
klaten in den letzten 5 Jahren ein?**

- 62 Antworten
- Durchschnittliche Anzahl: 3.32
- 39 % bewertet zwischen „4–5“

Antworten	2	5	31	19	5
					
Bewertungsergebnis	1	2	3	4	5

45. Wie schätzen Sie das Angebot von Kunststoffrezyklaten in den letzten 5 Jahren grundsätzlich ein? (mehrere Antworten möglich)



46. Bitte nennen Sie die wichtigsten dieser rechtlichen Hemmnisse für Ihr Unternehmen/Ihren Verband.

51 Antworten:

- Beschränkungen für den Einsatz von Rezyklaten im Direktkontakt mit Lebensmitteln – Fehlende Vorgaben für den Einsatz von Rezyklaten im Bereich Kosmetik.
- Einsatz von Rezyklaten für Lebensmittelverpackung.
- Lebensmittelzulassung.
- Einsatz von Rezyklaten in Automobilanwendungen und Sicherheitsteilen in Punkto Haftung kritisch.
- Gefahrgut- und Lebensmittelzulassung.
- Klarheit, über Anwendung/Bewertung von chem. Recycling, Weitergabe der Kunststoff-Abgabe und Rahmenbedingungen für PCR bei Lebensmittel-VP.
- Unklare, unflexible lebensmittelrechtliche Bestimmungen für das Rezyklat.
- Einsatz bei Lebensmittelverpackungen. Selbst durch chemisches Recycling gewonnene Rezyklate haben bis heute keine europäische Zulassung. Die gesetzlichen Hürden sind zu hoch und teils völlig überflüssig.
- Keine Zulassung von Rezyklaten für Food- oder Kosmetik-Verpackungen.
- Lebensmittelverpackungen, EU 10/2011 und 1935/2004.
- kein FDA Zulassung der PCR Materialien.
- Lebensmittelzulassung.
- FCM Tauglichkeit (e. g. VO 10/2011(EG)).

-
- Forderung nach Food Approval für die Anwendung bei Kosmetik-Produkten.
 - Auflagen für die Lebensmittelhygiene – keine PP Recyclate für Lebensmittelverpackungen verfügbar – bzw. nur in homöopathischen und Mengen ... seitens Industrie kaum bezahlbar.
 - Lebensmittelfreigabe.
 - 1. Einsatz von Non-Food Rezyklat darf max. 5 % betragen. 2. Definition von Rezyklat – Produktionsabfälle dürfen nicht als Rezyklat bezeichnet werden, sofern diese nicht fremd zugekauft werden. 3. Grenzwerte bei Fremdstoffen.
 - EC 10/2011.
 - Recyclate halten die Anforderungen der Lebensmittelbedarfsgegenstände-gesetzgebung nicht ein – Recyclate halten die Anforderungen der Gefahr-gutgesetzgebung nicht ein – Recyclate halten die Anforderungen für phar-mazeutische Verpackungen nicht ein.
 - Transportvorschriften, werden aber ab 2023 geändert aktuelle Normen, ISO 16103.
 - Lebensmittelbedarfsgegenständeverordnung.
 - Lebensmitteltauglichkeit! Keine Garantie möglich/erhältlich! Ist dies ein rechtliches Hemmnis?
 - Traceability (EuCertPlast, RecyClass, ISCC+).
 - Lebensmittelzulassung, Line-Clearance (Extrusion) nach PCR-Produktion, QM in Produktionsstätten in denen auch für Lebensmittelanwendungen pro-duziert wird, Zertifizierung der Lieferkette für Massenbilanz (z. B. ISCC+).
 - Kunststoffverordnung 10/2011 1935/2004.
 - Nutzung von PCR Material in Verpackungen mit Lebensmittelkontakt
 - Jegliche Vorgaben, wenn der Handel und Verbraucher nicht bereit ist, dafür auch zu bezahlen.
 - Vollumfängliche Einsatzmöglichkeiten, auch in Lebensmittelfolien.
 - Bedarfsgegenständeverordnung.
 - EFSA Approval.
 - Einsatz in Folien für Lebensmittelkontakt nicht erlaubt. Anerkennung von Chemcycling als freigegebenes Recyclingverfahren.
 - Die Herkunft von Input-Kunststoffen aus dem PCR-Bereich ist auf ge-trennte Sammlungen von reinen Lebensmittelverpackungen beschränkt. Die geforderte , zu hohe Quote von Lebensmittelverpackungen in den Sam-melsystemen schließt diese Quelle faktisch aus.

- Nur zertifizierte Recycler für FCM zugelassen, nur PET-Flaschenware aktuell möglich.
- FDA bzw. Lebensmittelzulassung.
- Vorgaben Verpackungen für Lebensmittelkontakt. Wir selber stellen zu über 95 % Lebensmittelverpackungen her.
- Food Contact.
- Möglicher Einsatz von Rezyklaten im Lebensmittelbereich.
- Keine Regelung zum Einsatz von Polyolefin Rezyklaten in Food & Beverage Verpackungen vorhanden. EFSA und EU versagen hier! Es fehlen grundsätzlich Regelungen zum Rezyklateinsatz in Abhängigkeit vom zu verpackenden Gut. Bsp. eine Flasche mit Kloreiniger hat andere Migrations- und Qualitätsanforderungen zu bestehen wie eine Flasche für Lebensmittel. Diese Vielfalt muss abgebildet werden.
- In vielen älteren Liefervorschriften ist keine Beimischung von Recyclingmaterial erlaubt, produziert man trotzdem mit Recyclingmaterial, kann der Kunden eine Mängelrüge aussprechen.
- Einsatz von Polyolefin-Rezyklaten im Bereich Verpackungen im direkten Kontakt mit Lebensmitteln (hier geht momentan nur „chem. recyceltes“ Material) – Risikobewertung im Hygiene-Produktionsbereich – Pre-Consumer (PIR)- und Post-Consumer (PCR)-Rezyklate sind noch nicht ausreichend definiert und das dt. Verpackungsgesetz würdigt nur PCR, obwohl es theoretisch bereits heute möglich wäre, PIR in den direkten Kontakt mit Lebensmitteln einzusetzen, werden die in niederschwellige Anwendungen eingesetzt, in die man auch PCR aus dem gelben Sack bringen könnte. – Im dt. Verpackungsgesetz ist das chem. Recycling noch nicht als Recycling anerkannt – der Einsatz von PCR-Recyclate wird ökonomisch noch nicht belohnt, obwohl das im Verpackungsgesetz vorgesehen ist.
- Wir haben mit keinen rechtlichen Hemmnissen zu kämpfen.
- Qualitätsvorgaben z. B. der Automobilindustrie.
- Verpackungsverordnung untersagt Einsatz von Rezyklaten im Kontakt mit Lebensmitteln (auch bei Coextrusion) – unklare rechtliche Lage bzw. unüberschaubare Anzahl an Regularien, Verordnungen, Vorschriften, Gesetzen,
- Food Contact Material – Da Kontamination nicht ausgeschlossen werden kann, ist der Einsatz von Rezyklat bei Lebensmittelkontaktmaterialien der-

zeit nicht erlaubt. Derzeit ist keine Recycling-Technologie für Polyolefine von EFSA zugelassen. Das heißt, dass die für einen Mindest-Rezyklat-Einsatz bei Lebensmittelverpackungen notwendige Menge an sicheren Rezyklaten am Markt nicht vorhanden ist. Andere Anwendungsbereiche für Rezyklate (nicht Lebensmittelverpackungen) bieten einen weitaus höheren Effekt (größere Mengen) bei wesentlich geringerem Gesundheits-Risiko.

- Regulierungen zum Lebensmittelkontakt „Claims“-Unklarheiten.
- Hürden für die Verwendung in Lebensmittelverpackungen und Gefahrgutverpackungen – Fehlende einheitliche Qualitätsstandard für Rezyklate.
- Für Industrieverpackungen mit Gefahrgutzulassung, wie sie unser Unternehmen herstellt, ist die DIN EN ISO 16103:2055 „Verpackung – Verpackungen zur Beförderung gefährlicher Güter – Recycling-Kunststoffe“ ein entscheidendes Hemmnis für die Verwendung von Rezyklat in unserem Kombinations-IBC. Während bei Kunststofffässern, mit Gefahrgutzulassung der Einsatz von Rezyklat seit vielen Jahren möglich ist, braucht es für den Einsatz bei Kombinations-IBC einen enorm hohen Aufwand. Dies ist zum einem ein aufwendiges Prüf- und Dokumentationsverfahren und zum anderen muss derzeit der Einsatz von Rezyklat mit jeder zuständigen Behörden eines Landes abgestimmt werden. Wir wünschen uns hier eine weiterhin starke Beteiligung der Deutschen Delegierten bei der Revision der DIN EN ISO 16103, damit schnellstmöglich ein einheitlicher Standard für den Gebrauch von Rezyklat in Kombinations-IBC innerhalb von Europa geschaffen wird.
- Verfügbarkeit von Food bzw. Pharmagrade.
- Thema Bleigehalt in PVC-Recyclaten (REACH) → in Altfenstern werden noch Bleistabilisatoren verwendet, die dann in den Recyclaten enthalten sind. Es entsteht ein Zielkonflikt der der erhöhten Verwendung von PCR im PVC-Bereich entgegensteht RAL GZ 716: Recyclat nur im Innenkern des Fensters erlaubt.
- Art und Qualität des Rezyklates für die Produktion von UN-Gefahrgutverpackungen.

47. Allgemein: Welche hemmenden rechtlichen Rahmenbedingungen könnten aus Ihrer Sicht ohne Abstriche am Verbraucher- und Umweltschutz entschärft oder gänzlich abgeschafft werden?

31 Antworten, u. a. (neueste Antworten):

- Von Rezyklate im Lebensmitteldirektkontakt vom Lebensmittel abhängig machen.
- Unterscheidung nach PIR und PCR. Das Umweltzeichen „Blauer Engel“ sollte auch für PIR gelten.
- Gefahrgut- und Lebensmittelzulassung.
- Bewertung von ChemRecycling.
- Erweiterung des Angebotes von rPET Flakes auf PET-Verpackungen außerhalb von PET-Flaschen.
- Freigabe durch EFSA oder ähnliche Gesetzgeber. Die Rezyklate können auch speziell durch z. B. einen Challengetest beim Fraunhofer-Institut freigegeben werden. Bzw. auf Basis dieses Tests kann der Hersteller von z. B. Lebensmittelverpackungen das „Risiko“ mit seinem Kunden abwägen.
- Zulassungen für Kosmetik-Verpackungen.
- Erstellung einer Kosmetik-Verordnung im Hinblick auf den Einsatz von PCR-Materialien.
- Unterscheidung zwischen Post Consumer und Industrial Recyclaten ... darüber hinaus gibt es zahlreiche Möglichkeiten mehr Recyclate zur Verfügung zu haben, so sollte die im Recyclingprozess vorgesehene Reinigungsstufe (Wasserbad!) für Kunststoffabfälle obligatorisch für alle „Gelben Säcke“ werden. Kaltwasserlösliche Kompositverbindungen von PPK-Fraktionen und Kunststoffen würden sich auch hier trennen und man könnte mehr Kunststoffabfälle recyceln. Bessere Sortierung u. a. für PET in den Leichtstoffsortieranlagen – hier liegt das größte Potenzial für eine Kreislaufwirtschaft! PET ist ein ideales Material für viele Anwendungen als Lebensmittelverpackung – da rPET in Lebensmittelqualität verfügbar ist, allerdings nur aus dem Flaschenrecycling/Pfandsystem. Ganz Europa bedient sich hier am gleichen Pool ...
- Zulassung chemisches Recycling als Ergänzung.
- Die 5 %-Regel.
- Wir glauben nicht an die Entschärfung bestehender Gesetzmäßigkeiten derart, dass Recyclate in den o. a. Bereichen eingesetzt werden könnten.
- Keine.

- Für Sekundärverpackung food safety.
- Verpackungen für Hygienepapiere fordern Folienverpackungen in Lebensmittelqualitäten.
- Vorgabeprozentsatz von Lebensmittelverpackungen an Input für Recycling aus dualen Systemen.
- Andere Materialien PET, Polyolefine ebenfalls zulassen.
- Schwierige Frage. Am besten eine Reform der EFSA Arbeitsweise und deren Vorgaben. Es gibt durchaus Verfahren die recht gut kontrollierbar sind aber trotzdem nicht genehmigt werden (können).
- EFSA-Vorgabe wonach 95 % des Inputs aus Food Anwendungen stammen muss (PET).
- Schwer zu beantworten, der Einsatz kann nur von Fall zu Fall bewertet werden.
- Der Einsatz von Rezyklaten ist nicht durch Umwelt-Gesetzgebungen limitiert. EU 10/2011 muss in Bezug auf die Migrationsbedingungen angeschaut werden.
- Liefer- und gesetzliche Vorschriften kurzfristig durcharbeiten und Recycling Ware komplett oder anteilig freigeben.
- Würdigung auch von PIR und Anerkennung von „chemisch recyceltem“ Material im Verpackungsgesetz – Einführung eines Bonus-/Malus- Systems, das den Einsatz von Rezyklaten gegenüber virgin-Material ökonomisch attraktiv macht.
- Siehe Antwort 7.
- Keine.
- Die DIN EN ISO 16103 muss komplett überarbeitet werden, um den Einsatz von Rezyklat in industriellen Gefahrgutverpackungen zu ermöglichen.
- Das achtlose Wegwerfen und die Entsorgung von Müll in der Umwelt sollte viel härter bestraft werden.

48. Wie hoch ist der Anteil von Rezyklaten im Verhältnis zu Ihrem gesamten Kunststoffeinsatz (in %)?

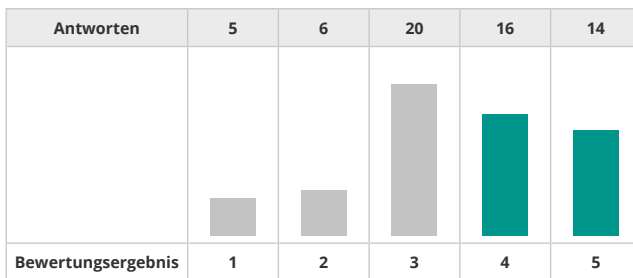
61 Antworten, u. a. (neueste Antworten): 2 %, 22 % ...

49. Auf welchen Prozentsatz ließe sich Ihr Rezyklatanteil aus Ihrer Sicht erhöhen, wenn die o.g. rechtlichen Beschränkungen entschärft oder abgeschafft würden?

53 Antworten, u. a. (neueste Antworten): 1 %, 100 % ...

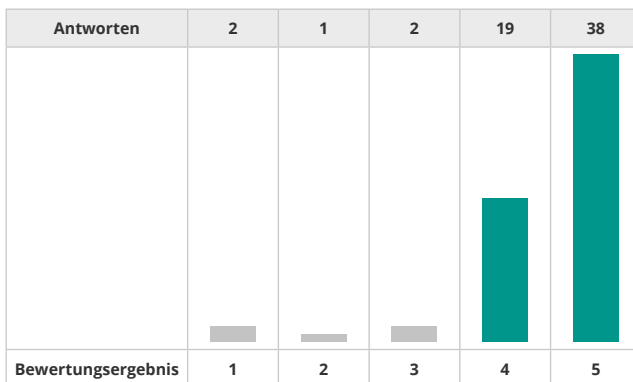
50. Erzielbare Preise

- 61 Antworten
- Durchschnittliche Bewertung: 3.46
- 49 % bewertet zwischen „4–5“



51. Qualitätsanforderungen

- 62 Antworten
- Durchschnittliche Bewertung: 4.45
- 92 % bewertet zwischen „4–5“



52. Vertragslaufzeiten mit Abnehmern

- 58 Antworten
- Durchschnittliche Bewertung: 2.45 
- Bewertungsverteilung: 16 % bewertet zwischen „4–5“

Antworten	12	19	18	7	2
					
Bewertungsergebnis	1	2	3	4	5

53. Vertragsumfang/Liefermengen

- 61 Antworten
- Durchschnittliche Bewertung: 3.52 
- 54 % bewertet zwischen „4–5“

Antworten	6	7	15	15	18
					
Bewertungsergebnis	1	2	3	4	5

54. Weitere

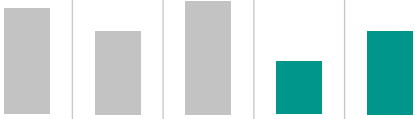
10 Antworten:

- Dauerhafte, konstante Verfügbarkeit von geeigneten Rezyklaten.
- Lebensmittelrechtliche Anforderungen.
- Im deutschen LEH haben die 4 großen Ketten fast Monopolstatus ... Risiko wird auf Lieferanten/Produzenten verschoben.
- Bei entsprechender Materialqualität (Recyclat und damit auch unserer Endprodukte) besteht bei den derzeitigen rechtlichen Vorgaben kein Absatzproblem. Das Problem liegt in der Beschaffung ausreichend Recyclat in besagter Qualität zu erhalten.

- Lebensmitteltauglichkeit!
- Da es in erster Linie C-Artikel sind, die wir herstellen, muß erst das Verständnis der Kunden gefördert werden, dass bei diesen Artikeln auch Post-industriell-Regenerate und PCR eingesetzt werden dürfen und können. Nicht bei allen Fertigungsanlagen kann Recycling-Granulat eingesetzt werden.
- Zuverlässige Verfügbarkeit ist nicht gegeben.
- Akzeptanz der Kunden ist noch zu niedrig, z. B. müssen PE-Verpackungen für Fußmatten im Auto mit 1A Ware hergestellt werden!
- PET ist noch nicht reif für den geschlossenen Kreislauf (Food-Primärverpackungen zu Food-Primärverpackungen).

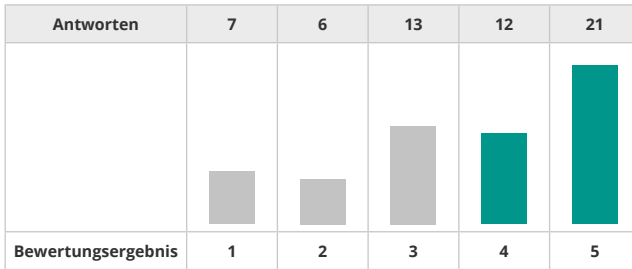
55. Reduzierung der Umsatzsteuer auf 7 % für Rezyklate

- 58 Antworten
- Durchschnittliche Bewertung: 2.83 
- 31 % bewertet zwischen „4–5“

Antworten	14	11	15	7	11
					
Bewertungsergebnis	1	2	3	4	5

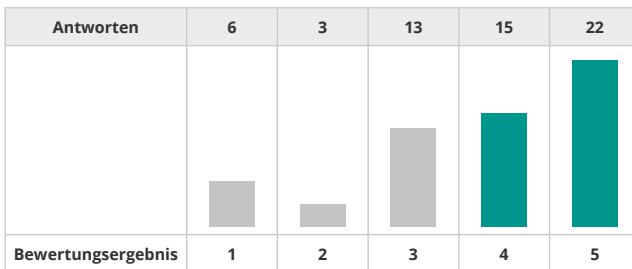
56. Sonder-AfA bei Investitionen in moderne Sortier- und Verarbeitungstechnik

- 59 Antworten
- Durchschnittliche Bewertung: 3.58 
- 56 % bewertet zwischen „4–5“



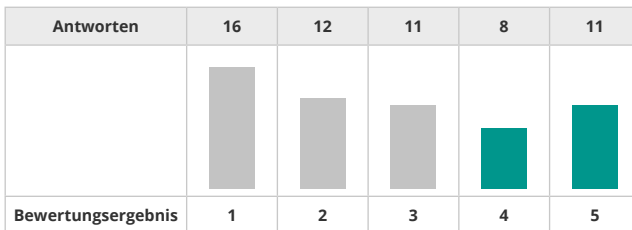
57. Förderung von Investitionen in und Beteiligungen an Unternehmen, die Rezyklate produzieren

- 59 Antworten
- Durchschnittliche Bewertung: 3.75
- 63 % bewertet zwischen „4–5“



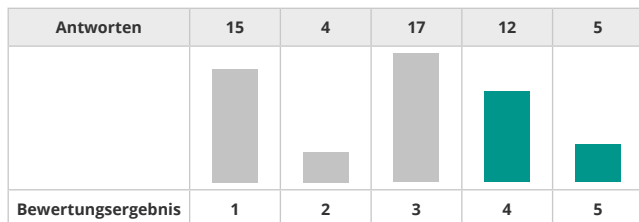
58. Vorgeschriebene Mindestquote für Rezyklateinsatz

- 58 Antworten
- Durchschnittliche Bewertung: 2.76
- 33 % bewertet zwischen „4–5“



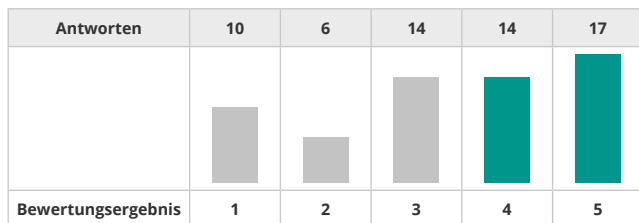
59. Vorgaben bzw. Vorteile bei öffentlicher Auftragsvergabe bei den Anwendern von Rezyklaten

- 53 Antworten
- Durchschnittliche Bewertung: 2.77 
- 32 % bewertet zwischen „4–5“



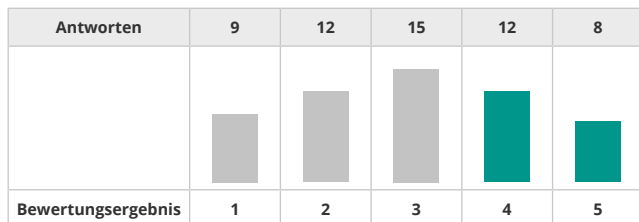
60. Vorgaben für kreislaforientiertes Produktdesign

- 61 Antworten
- Durchschnittliche Bewertung: 3.36 
- 51 % bewertet zwischen „4–5“



61. Cradle-to-Cradle-Zertifikat für Rezyklate (analog „Blauer Engel“)

- 56 Antworten
- Durchschnittliche Bewertung: 2.96 
- 36 % bewertet zwischen „4–5“



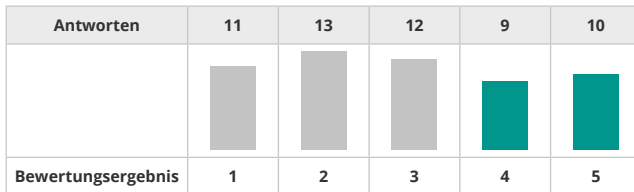
62. CO₂-Bepreisung auf Reststoffe für die thermische Verwertung

- 57 Antworten
- Durchschnittliche Bewertung: 2.47 
- 19 % bewertet zwischen „4–5“



63. Lockerung von Qualitätsanforderungen auf Kunststoffe

- 55 Antworten
- Durchschnittliche Bewertung: 2.89 
- 35 % bewertet zwischen „4–5“



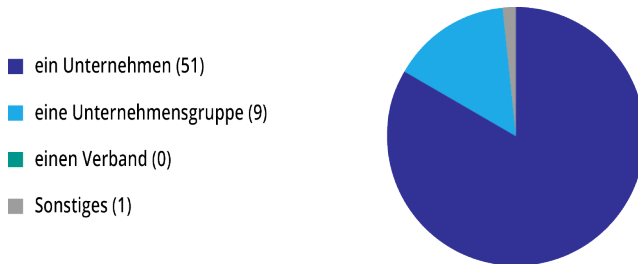
64. Weitere

6 Antworten:

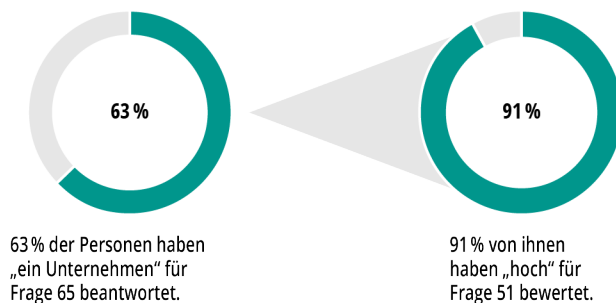
- Meinungsbildung/Sensibilisierung für sortenreine Sammlung/Trennung beim Endverbraucher. Bessere (für den Laien leicht erkennbare) Kennzeichnung der Kunststoffsorten/Arten.
- Kunststoff eignet sich derzeit v. a. zum Downcycling, dieser notwendige Schritt zur Technologieentwicklung wird gänzlich ausser acht gelassen.
- Chemcycling akzeptieren und fördern, plus alternative Verfahren (Beispiele Saperatec, APK).
- Eco Modulation muss die Basis der Bewertung von Verpackungen aller Art werden, unabhängig vom Material das eingesetzt wird. ÖKO Bilanz nach Din 14040. Hierarchie der Bewertung – CO₂-Äquivalente, Rezyklingfähigkeit, Rezyklatgehalt.

- Bonus-/Malus-System, die den Einsatz von Rezyklate attraktiver machen
 - ▷ auch für sehr teure sehr hochwertige Rezyklate
 - ▷ rechtlich anerkannte Zertifizierung für PCR- und PIR-Gehalte in beliebiger Menge
 - ▷ blauer Engel hat den Nachteil, dass nur > 80 % und nur PCR zertifiziert werden.
- Mindestquote für Rezyklateinsatz bei Lebensmittelverpackungen ist nur möglich, wenn lebensmittelsicheres Rezyklat in ausreichender Menge und Qualität am Markt verfügbar ist.

65. Sie vertreten hier



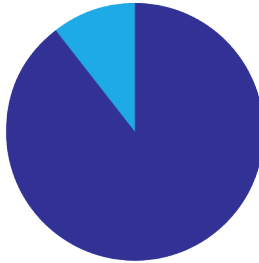
→ 63 % der Befragten beantworteten die Frage mit „ein Unternehmen“ und die Mehrheit unter ihnen beantwortete die Frage 51 mit „Hoch“



66. Anzahl der Mitarbeiter (nicht veröffentlicht)

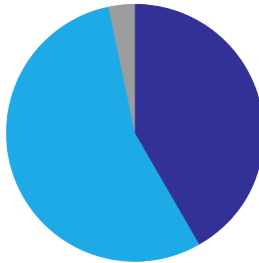
67. Wir möchten über die Ergebnisse des Gutachtens informiert werden, sofern der Bundestag eine Freigabe erteilt.

- Ja (52)
- Nein (6)



68. Erklären Sie sich für ein ergänzendes Telefongespräch im Nachgang zur Befragung bereit?

- Ja (25)
- Nein (33)
- Sonstiges (2)



69. Ansprechpartner (nicht veröffentlicht)

70. Institution

- Pöppelmann GmbH & Co. KG Kunststoffwerk-Werkzeugbau
- Paccor
- W. und H. Fernholz
- Georg Menshen GmbH & Co. KG
- Zeller Plastik Deutschland GmbH Werk: Zell & Finnentrop
- VOLPINI Verpackungen GmbH Austria
- Flexico Verpackungen GmbH
- silver plastics GmbH & Co. KG
- Horn & Bauer GmbH & Co. KG
- Roundliner GmbH

- Fa. Pfefferkorn
- DUO PLAST AG
- Schur Flexibles Group
- Buergofol GmbH
- EK-Pack Folien GmbH
- W. u. H. Fernholz, Kunststoffverarbeitung
- Südpack Verpackungen GmbH & Co. KG
- Berry Superfos Bremervörde Packaging GmbH
- Verpa GmbH
- Alpla Werke Lehner GmbH & Co. KG
- Steinacker GmbH
- POLIFILM EXTRUSION GmbH
- PCW GmbH
- SKZ KFE gGmbH Halle (Saale)
- Windmüller & Hölscher
- Constantia Flexibles
- Werit Kunststoffwerke W. Schneider GmbH & Co. KG
- Schütz GmbH & Co. KGaA, Schützstr. 12, 56242 Selters
- Gaplast GmbH
- Bischof + Klein
- Schüco PT
- Schoeller Allibert Swiss

71. Telefonnummer (nicht veröffentlicht)

72. E-Mail (nicht veröffentlicht)

Anlage 3: Label für Kunststoffrezyklate nach DIN SPEC 91446:2021-10

Company Logo A1

Material according to DIN SPEC 91446:2021-10 B1

DQL 1	DQL 2	DQL 3	DQL 4
		A	

Product Name: Recyclate Destination 2030 nat C1

Color: C2

HDPE D1 R30 D2

Condition: Regrind / Regranulate / Recomound D3

-50% E1

Recyclate: 945 kg CO_{2e}
Virgin: 1890 kg CO_{2e} E2

PCR E3		PIR E6
MC E4 15	SC E5 5	10

Erläuterung:

DQL	Datenqualitätslevel (Stufe 4 = höchste Stufe an verifizierbaren Daten wie z. B. genaue Herkunft, DSC, MFI, mechan. + elektr. Eigenschaften)
R30	Anteil 30 % Rezyklat im Kunststoffprodukt
PCR MC	15 % PCR aus M ixed C ollection (gemischte Sammlung, z. B. Gelbe Tonne)
PCR SC	5 % PCR aus S elective C ollection (ausschließlich HDPE-Abfälle)

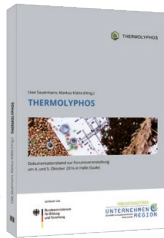
Bereits in der Steinbeis-Edition erschienen

Über die Reihe

Ressourcentechnologien sind in den letzten Jahren immer mehr in den Fokus der öffentlichen Aufmerksamkeit gerückt. Aber auch hier gibt es Randthemen, die aufgrund der Marktgröße, technologischen Risiken oder einfach aufgrund von gesetzlichen Regelungen ein Nischendasein führen. Diese Technologien werden untersucht und die Möglichkeiten sowie Grenzen bewertet.

Seit über 20 Jahren befasst sich das **Steinbeis-Transferzentrum Ressourcentechnologie und Management (R.T.M.)** mit innovativen Ressourcentechnologien sowie entsprechenden Produkt- und Prozessinnovationen. Das Steinbeis-Transferzentrum R.T.M. unterstützt dabei u. a. die Ansiedlung von mittelständischen Unternehmen und Existenzgründern in der Region Halle und darüber hinaus.

www.steinbeis-rtm.de



THERMOLYPHOS

Dokumentationsband zur Forumsveranstaltung
am 4. und 5. Oktober 2016 in Halle (Saale)

ISBN 978-3-95663-070-5 (Print) | 29,90 €

ISBN 978-3-95663-147-4 (Non-Print) | 19,90 €

Evaluierung unter Realbedingungen von thermisch-chemischen Depolymerisationstechnologien (Zersetzungsverfahren) zur Verwertung von Kunststoffabfällen

ISBN 978-3-95663-234-1 (Non-Print) | Kostenfrei



www.steinbeis-edition.de

Die Europäische Gemeinschaft fordert von ihren Mitgliedsstaaten bis 2030 eine Rezyklateinsatzquote (PCR) bei neuen Kunststoffverpackungen von 30 % bei PET- bzw. 35 % bei sonstigen Plastikverpackungen. Das bedeutet für Deutschland eine Verdreifachung gegenüber dem aktuellen Stand, 2040 sollen es 50 % bzw. 65 % sein – eine enorme Herausforderung für die Etablierung des Gebots einer circular economy in der Kunststoffbranche.

Die vorliegende Studie aus dem Jahr 2022 beleuchtet den Status quo des Kunststoffrecyclings und untersucht die Ursachen der aktuell unzureichenden Nutzung von Rezyklaten. Zunächst werden die werkstofflichen Eigenschaften von Kunststoffen, insbesondere von Verpackungen, sowie die technischen Herausforderungen für Recyclingunternehmen beschrieben.

Ein weiterer Schwerpunkt liegt auf dem wirtschaftlichen und rechtlich-regulatorischen Rahmen, um Ansatzpunkte für Politik und Stakeholder zu identifizieren, mit dem Ziel, die Hindernisse für eine höhere Rezyklateinsatzquote abzubauen. Die Autoren machen konkrete Vorschläge und gehen auf offene Fragen ein. Die Ausarbeitung versteht sich als Diskussionsangebot für alle Akteure, die das Kunststoffrecycling zukunftsfähig gestalten wollen – und müssen.

Erschienen in der Reihe „Ressourcen-Technologie und Management“ des Steinbeis-Transferzentrums Ressourcen-Technologie und Management (Hrsg.)