



# Ökologische und ökonomische Bewertung des Ressourcenaufwands

Einsatz von rezyklierten Kunststoffen in  
Verpackungsmaterialien



Studie: Ökologische und ökonomische Bewertung des Ressourcenaufwands – Einsatz von rezyklierten Kunststoffen in Verpackungsmaterialien

Autorinnen und Autoren:

Dr. Andreas R. Köhler, Öko-Institut e. V. – Institut für angewandte Ökologie

Daniela Eckert, Öko-Institut e. V. – Institut für angewandte Ökologie

Tobias Schleicher, Öko-Institut e. V. – Institut für angewandte Ökologie

Dr.-Ing. Winfried Bulach, Öko-Institut e. V. – Institut für angewandte Ökologie

Dr.-Ing. Joachim Christiani, Institut Cyclos HTP GmbH

Fachliche Ansprechpartnerin:

Dr.-Ing. Ulrike Lange, VDI Zentrum Ressourceneffizienz

Die Studie wurde im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz erstellt.

Redaktion:

VDI Technologiezentrum GmbH

VDI-Platz 1

40468 Düsseldorf

Tel. +49 30-27 59 506-0

[zre-info@vdi.de](mailto:zre-info@vdi.de)

[www.ressource-deutschland.de](http://www.ressource-deutschland.de)

Titelbild: © PantherMedia/Peryn

Gedruckt auf umweltfreundlichem Recyclingpapier.

**VDI ZRE Publikationen:  
Studien**

**Ökologische und ökonomische  
Bewertung des Ressourcenaufwands**

**Einsatz von rezyklierten Kunststoffen in  
Verpackungsmaterialien**



# INHALTSVERZEICHNIS

ABBILDUNGSVERZEICHNIS	6
TABELLENVERZEICHNIS	7
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	8
KURZFASSUNG	12
1 EINLEITUNG	18
1.1 Die Nutzung rezyklierter Kunststoffe zur Herstellung neuer Verpackungen	18
1.2 Untersuchungsgegenstand	21
1.3 Ziele und Forschungsfragen der Studie	22
2 SACHSTAND UND PERSPEKTIVEN DES KUNSTSTOFFRECYCLINGS	23
2.1 Marktrelevanz und Markttrends im Kunststoffrecycling und Diskussion der Chancen und Herausforderungen	23
2.1.1 Quantität und Qualität von Kunststoffabfällen und Rezyklaten	23
2.1.2 Preisentwicklung von Neuware und Rezyklaten	33
2.1.3 Verfügbarkeit und Beschaffung von Rezyklaten	35
2.2 Stand der Technik und Innovationen im Recyclingprozess von Kunststoffabfällen aus Leichtverpackungen	39
2.2.1 Erfassung und Sortierung der Abfallströme	39
2.2.2 Aufbereiten und Regranulieren der Wertstoff- fraktionen	48
2.2.3 Informationsmöglichkeiten zum Rezyklateinsatz für kunststoffverarbeitende Unternehmen	51
2.3 Darstellung der technischen Parameter für die Herstellung neuer Verpackungen aus rezyklierten Kunststoffen	53

2.4	Politische und regulatorische Rahmenbedingungen für den Einsatz von Kunststoffrezyklaten heute und in Zukunft	55
2.4.1	EU-Kunststoffstrategie und Einwegkunststoffrichtlinie	56
2.4.2	EU-Verpackungsrichtlinie (EU-VerpackRL)	57
2.4.3	EU-Aktionsplan Kreislaufwirtschaft	58
2.4.4	EU-Kunststoffabgabe	58
2.4.5	Deutsches Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG)	59
2.4.6	Verpackungsgesetz (VerpackG)	60
2.4.7	Brancheninitiative der Industrievereinigung Kunststoffverpackungen e.V.	62
2.5	Herausforderungen und Lösungsansätze beim Rezyklateinsatz	63
3	METHODISCHES KONZEPT DER STUDIE	68
3.1	Ökologische und ökonomische Bewertungsmethoden	68
3.1.1	Modelle zur ökologischen Wirkungsabschätzung	69
3.1.2	Modelle zur ökonomischen Bewertung	72
3.2	Untersuchungsrahmen der Studie	72
3.2.1	Beschreibung der betrachteten Verpackungsvarianten	73
3.2.2	Funktionelle Einheit	73
3.2.3	Systemgrenze der Bilanzierung	74
3.2.4	Allokationsregeln	76
3.2.5	Anforderungen an die Datenqualität und -herkunft	78
3.2.6	Abschneidekriterien	80
3.3	Inventarisierung der Sachbilanz	82
3.3.1	Daten für die ökologische Bewertung	82
3.3.2	Daten für die ökonomische Bewertung	86
4	VERGLEICHENDE ÖKOLOGISCHE UND ÖKONOMISCHE BEWERTUNG	87
4.1	Ökologische Bewertung	87
4.1.1	Kumulierter Energieaufwand	87

4.1.2	Kumulierter Rohstoffaufwand	88
4.1.3	Wasserverbrauch	90
4.1.4	Treibhausgasemissionen	91
4.1.5	Inanspruchnahme von Flächen	92
4.2	Rohstoffkritikalität – Versorgungsrisiko	92
4.3	Ökonomische Bewertung	95
4.3.1	Relative Kosten	96
4.3.2	Preisentwicklungen und Marktumfeld	97
4.4	Sensitivitätsanalyse	99
5	FAZIT UND EMPFEHLUNGEN	106
5.1	Beurteilung der ökologischen und ökonomischen Zweckmäßigkeit der Verwendung von Kunststoffrezyklaten für die Herstellung neuer Verpackungen	106
5.2	Empfehlungen für KMU zur Verbesserung der praktischen Anwendbarkeit von Rezyklaten	108
	LITERATURVERZEICHNIS	112

**ABBILDUNGSVERZEICHNIS**

Abbildung 1:	Schematische Darstellung der LVP-Sortierung	41
Abbildung 2:	Veranschaulichung von Ergebnissen der Feinabsiebung bei der LVP-Sortierung	44
Abbildung 3:	Schematische Darstellung des trocken-/nassmechanischen Verfahrens zur Kunststoffaufbereitung nach dem Stand der Technik	48
Abbildung 4:	Vereinfachtes Verfahrensfliessbild der PP-Verwertung	49
Abbildung 5:	rPP-Regranulat (links: dunkelgraue Basisvariante, rechts: schwarz pigmentiert)	51
Abbildung 6:	Abfallhierarchie gemäß Kreislaufwirtschaftsgesetz	60
Abbildung 7:	Schematische Darstellung des Farbeimersystems JETO+ 110-01 der Firma Jokey SE	73
Abbildung 8:	Übersicht zu in der Fallstudie berücksichtigten Teilprozessen innerhalb der betrachteten Systemgrenze	75
Abbildung 9:	Kumulierter Energieaufwand je funktioneller Einheit	87
Abbildung 10:	Kumulierter Rohstoffaufwand je funktioneller Einheit	89
Abbildung 11:	Wasserverbrauch je funktioneller Einheit	90
Abbildung 12:	Treibhausgaspotenzial je funktioneller Einheit	91
Abbildung 13:	Vergleich relativer Kostenanteile bei der Kunststoffeimerproduktion aus Primär-PP vs. recyceltem PP	97
Abbildung 14:	Preisentwicklung von sekundärem, homopolymeren PP-Altstoffen in Deutschland	98
Abbildung 15:	Vergleich Treibhausgaspotenzial der Szenarien	101
Abbildung 16:	Vergleich von KEA-Basisszenarien mit Sensitivitätsszenarien	102



---

**TABELLENVERZEICHNIS**

Tabelle 1:	Überblick der materialspezifischen Prüfstandards für PE und PP	27
Tabelle 2:	Sortierausbeute bezogen auf den Polymeranteil im Input	47
Tabelle 3:	Aufbau des Basisszenarios	78
Tabelle 4:	Sachbilanz der Inputs in den Herstellungsprozess	83
Tabelle 5:	Sachbilanz der Outputs aus dem Herstellungsprozess	84
Tabelle 6:	Indikatoren der VDI-Richtlinie 4800, Blatt 2	92
Tabelle 7:	Kritikalitätswerte für metallische Rohstoffe	94
Tabelle 8:	Kritikalitätswerte für fossile Rohstoffe	94
Tabelle 9:	Gewichtete Rohstoffkritikalität der identifizierten Metalle	94
Tabelle 10:	Gewichtete Rohstoffkritikalität für fossile Rohstoffe	95
Tabelle 11:	Aufbau der Szenarien entsprechend den Allokationsregeln	100

**ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS**

<b>APOS</b>	Allocation at the Point of Substitution
<b>B2B</b>	Business to Business (Geschäftskundenmarkt)
<b>B2C</b>	Business to Customer (Endkundenmarkt)
<b>BDE</b>	Bundesverband der Deutschen Entsorgungs-, Wasser- und Kreislaufwirtschaft e.V.
<b>BEW</b>	Bildungszentrum für die Ver- und Entsorgungswirtschaft
<b>BMBF</b>	Bundesministerium für Bildung und Forschung
<b>BMUV</b>	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz
<b>CO<sub>2eq</sub></b>	Kohlenstoffdioxid-Äquivalente
<b>DIN SPEC</b>	Konsortialstandard
<b>DQL</b>	Datenqualitätslevel
<b>EOL</b>	End of Life (Ende des Lebenszyklus)
<b>EPS</b>	Expandiertes Polystyrol
<b>EU</b>	Europäische Union
<b>FE</b>	Funktionelle Einheit
<b>GVM</b>	Gesellschaft für Verpackungsmarktforschung
<b>GWP</b>	Global Warming Potential (Treibhauspotenzial)
<b>IK</b>	Industrievereinigung Kunststoffverpackungen e.V.

---

<b>IML</b>	Inmould Label
<b>IPCC</b>	Intergovernmental Panel on Climate Change (Weltklimarat)
<b>ISCC</b>	International Sustainability and Carbon Certification
<b>KEA</b>	Kumulierter Energieaufwand
<b>KEAE</b>	Kumulierter Energieaufwand – Entsorgung/Recycling
<b>KEAH</b>	Kumulierter Energieaufwand – Herstellung
<b>KEAN</b>	Kumulierter Energieaufwand – Nutzung
<b>KI</b>	Künstliche Intelligenz
<b>KIMW</b>	Kunststoff-Institut für die mittelständische Wirtschaft NRW GmbH
<b>KMU</b>	Kleine und mittlere Unternehmen
<b>KRA</b>	Kumulierter Rohstoffaufwand
<b>KrWG</b>	Kreislaufwirtschaftsgesetz
<b>KUZ</b>	Kunststoff Zentrum Leipzig
<b>kt</b>	Kilo-Tonnen (1.000 Tonnen)
<b>LCA</b>	Life Cycle Assessment
<b>LCC</b>	Life Cycle Costing
<b>LKW</b>	Lastkraftwagen
<b>LVP</b>	Leichtverpackungsfraction
<b>Ma.-%</b>	Masseprozent

<b>MFR</b>	Melt Flow Rate (Schmelze-Volumenfließrate)
<b>MPO</b>	Gemischte Polyolefinartikel
<b>NIR</b>	Nahes Infrarotlicht
<b>OBRP</b>	Ocean Based Recycled Plastics
<b>PCR</b>	Post-Consumer-Rezyklat
<b>PE-(LD/HD)</b>	Polyethylen-(Low-Density/High-Density)
<b>PE-HMW</b>	Hochmolekulares Polyethylen
<b>PET</b>	Polyethylenterephthalat
<b>PO</b>	Polyolefin Kunststoffe
<b>PP</b>	Polypropylen
<b>PS</b>	Polystyrol
<b>rPP</b>	Rezykliertes Polypropylen
<b>RAL-GZ</b>	Gütezeichen der RAL Deutsches Institut für Gütesicherung und Kennzeichnung e.V.
<b>REACH</b>	Chemikalienverordnung zur Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung chemischer Stoffe
<b>SKZ</b>	Süddeutsches Kunststoff-Zentrum
<b>SVHC</b>	Besonders besorgniserregende Stoffe
<b>THG</b>	Treibhausgas
<b>UZ</b>	Umweltzeichen
<b>VerpackG</b>	Verpackungsgesetz

<b>VDI</b>	Verein Deutscher Ingenieure e.V.
<b>VDI TZ</b>	VDI Technologiezentrum GmbH
<b>VDI ZRE</b>	VDI Zentrum Ressourceneffizienz

## KURZFASSUNG

Das Recycling von Kunststoffen stellt einen Schwerpunkt der politischen und regulatorischen Bestrebungen der Europäischen Union (EU) zur Stärkung der Kreislaufwirtschaft (Circular Economy) dar. Bis zum Jahr 2030 sollen alle in der EU auf den Markt gebrachten Kunststoffe wiederverwendbar sein oder auf wirtschaftlich vertretbare Weise recycelt werden, so die EU-Kunststoffstrategie. Darüber hinaus soll der Anteil der Rezyklate in der Kunststoffverarbeitung deutlich erhöht werden, um einerseits die Nachfrage nach rezyklierten Kunststoffen zu steigern und andererseits die Wirtschaftlichkeit des Kunststoffrecyclings zu fördern. Außerdem kann der verstärkte Einsatz von Rezyklaten dazu beitragen, die Abhängigkeit Europas von Rohölimporten zu verringern und das Klimaziel zur Senkung der Treibhausgasemissionen bis zum Jahr 2030 um mindestens 55 % zu erreichen. Zu diesem Zweck wurde beispielsweise die im deutschen Verpackungsgesetz festgelegte Verwertungsquote für Kunststoffabfälle ab dem Jahr 2022 auf 63 % angehoben. Um die Wiedereinsatzquote recycelter Kunststoffabfälle im Verpackungssektor zu erhöhen, ist es zudem notwendig, sowohl die Qualität des Rezyklats zu verbessern als auch die Anforderungen an die Eigenschaften der in Verpackungen verwendeten Kunststoffe an die Rezyklatqualität anzupassen.

Im ersten Teil dieser Studie wird ein Einblick in den Stand und die Perspektiven des Kunststoffrecyclings im Bereich der Verpackungskunststoffe (insbesondere Polyolefine) gegeben. Hierfür bietet die Studie zu Beginn einen Überblick über den aktuellen Stand der Technik und Innovationen im Kunststoffrecycling. Vor dem Hintergrund einer Zusammenfassung politischer und regulatorischer Rahmenbedingungen werden die Chancen und Herausforderungen für den Einsatz von Rezyklaten im Verpackungsbe-  
reich diskutiert. Sowohl für die kunststoffverarbeitende Industrie als auch die Verwendenden von Kunststoffprodukten, wie z. B. den Verpackungssektor, stellen die kreislaufwirtschaftlichen Entwicklungen eine Chance dar, den Einsatz von Rezyklaten zu intensivieren. Doch konnten

Kunststoffverpackungsabfälle aufgrund unzureichender Sortierung und Aufbereitung bis vor wenigen Jahren meist nur zu inhomogenen Rezyklaten mit schwankender Zusammensetzung verarbeitet werden. Solche minderwertigen Rezyklate sind für klobige Produkte mit geringen Anforderungen an die Maßhaltigkeit und Formstabilität geeignet. Dagegen erfordert das Schließen von Stoffkreisläufen im Verpackungsbereich den Einsatz hochwertiger Rezyklate, die sich durch eine geringere Schwankungsbreite ihrer technischen Eigenschaften auszeichnen und minimale Anteile an Verunreinigungen enthalten. Obwohl die Marktverfügbarkeit hochwertiger Rezyklate bislang gering war, tragen erhebliche Investitionen in den Recyclingsektor zur Entwicklung eines neuen Markts für hochwertige Rezyklate bei. Vor dem Hintergrund politischer und regulatorischer Vorgaben wird erwartet, dass dieser Markt in Zukunft stark wächst und eine bessere Verfügbarkeit von hochwertigem Recyclingmaterial nach sich zieht.

Der Fokus der vorliegenden Studie richtet sich auf eine ökologische Vergleichsrechnung sowie eine Kostenbetrachtung von zwei Verpackungsvarianten, die einerseits aus Kunststoffneuware und andererseits aus recyceltem Kunststoff mit einem Anteil von ca. 5 % Kunststoffneuware<sup>1</sup> hergestellt werden. Anhand eines konkreten Fallbeispiels aus der industriellen Produktion anspruchsvoller Verpackungsprodukte (spritzgegossener Farbeimer mit Deckel) werden die Umweltauswirkungen beider Materialien (neues Polypropylen (PP) und rezykliertes Polypropylen) miteinander verglichen.

Im Einzelnen werden die folgenden Forschungsfragen untersucht:

- (1) Welcher Energiebedarf, ausgedrückt als „Kumulierter Energieaufwand“ (KEA), ist den beiden Verpackungsvarianten über deren gesamten Lebensweg in Rechnung zu stellen?

---

<sup>1</sup> Im Folgenden wird auf den deklaratorischen Zusatz „mit einem Anteil von ca. 5 % Kunststoffneuware“ für die gewählte Verpackungsvariante aus recyceltem Kunststoff (Farbeimer) verzichtet.

- (2) Welcher Rohstoffverbrauch, ausgedrückt als „Kumulierter Rohstoffaufwand“ (KRA), und welcher Wasserverbrauch sind den beiden Verpackungsvarianten über deren gesamten Lebensweg in Rechnung zu stellen?
- (3) Wie hoch ist das Treibhausgaspotenzial, ausgedrückt in CO<sub>2</sub>-Äquivalenten (CO<sub>2eq</sub>), der Verpackungsvarianten über deren gesamten Lebensweg?
- (4) Welcher in Anspruch genommene Flächenbedarf (Waldflächen, Landwirtschaftsflächen, Siedlungs- und Verkehrsflächen, Brach- und Wasserflächen)<sup>2</sup> ist bei der Herstellung der betrachteten Verpackungsvarianten zu berücksichtigen?
- (5) Welche Kosten ergeben sich für die Herstellung der betrachteten Verpackungsvarianten?

Das Ergebnis der vergleichenden Ökobilanz zeigt, dass das Treibhausgaspotenzial (THG-Potenzial) des aus recyceltem PP gefertigten Produkts um 25 % geringer ist als das THG-Potenzial der Produktvariante aus neuem PP. Im untersuchten Basisszenario hat der aus PP-Rezyklat hergestellte Farbeimer ein THG-Potenzial von 1,31 kg CO<sub>2eq</sub> pro funktionelle Einheit (FE).<sup>3</sup> Der aus PP-Neuware hergestellte Farbeimer kommt unterdessen auf 1,74 kg CO<sub>2eq</sub> pro FE.

Beim Vergleich des kumulierten Energie- und Rohstoffaufwands entsprechend den Normvorgaben der VDI 4800 Blatt 2 zeigen die Ergebnisse einen noch deutlicheren Einspareffekt: Im Rahmen der betrachteten Systemgrenze und der gewählten Allokationsregeln (vgl. Kapitel 3.2) hat der rezyklatbasierte Farbeimer einen kumulierten Gesamt-Energieaufwand (KEA) von -2,9 MJ-Äquivalenten pro funktionelle Einheit. Dies gründet auf

---

<sup>2</sup> Vgl. VDI 4800 Blatt 2:2018-03.

<sup>3</sup> **Anmerkung:** Das Ergebnis ist aufgrund auftretender Fehler einer gewissen Schwankungsbreite unterworfen und nicht als absolut zu verstehen. Im Rahmen der dieser Studie wird im Kapitel 4.4 eine qualitative Diskussion möglicher Fehlerquellen durchgeführt.



einer Energiegewinnung durch die thermische Verwertung, die den Energieaufwand für die Sortierung, Aufbereitung und Rezyklatherstellung überkompensiert. Der Eimer aus PP-Neuware weist unterdessen einen KEA von 25,3 MJ-Äquivalenten auf. Dieser Wert ist auf den Energieaufwand für die Herstellung von neuem Polypropylen zurückzuführen, der den rezyklierten Materialien nicht angerechnet wird. Zwar resultiert auch aus der energetischen Verwertung von neuwarebasierten Kunststoffabfällen eine Gutschrift, jedoch führt erst der Einsatz von Rezyklaten in einem zweiten Lebenszyklus zu einem ökologischen Vorteil über den gesamten Lebensweg des Kunststoffs.

Auch mit Blick auf den Wasserverbrauch im gesamten Lebenszyklus schneidet die Produktvariante aus Rezyklat deutlich besser ab als die Variante aus Primärkunststoff. Die Ergebnisse zeigen, dass der Rezyklateimer nur ein gutes Drittel (rund 2,46 l/FE) des Wasserverbrauchs eines Neuware-Eimers (7,74 l/FE) verursacht.

Im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse wurden die Auswirkungen der getroffenen Annahmen bezüglich der Aufteilung (Allokation) von Umweltlasten zwischen dem ersten Lebensweg des PP (Leichtverpackung) und dem zweiten Lebensweg (Verpackung aus PP-Rezyklat) untersucht. Dazu wurden neben dem Basisszenario – gemäß der VDI-Richtlinie 4800 Blatt 2 – zwei weitere Szenarien getestet, die den aktuellen wissenschaftlichen Diskurs über die Verteilung der Umweltlasten zwischen dem ersten und zweiten Lebenszyklus des Kunststoffs thematisieren. Im 50/50-Szenario gilt eine Gleichverteilung der Umweltlasten und Gutschriften für die PP-Primärproduktion und Entsorgung zwischen dem ersten und dem zweiten Lebensweg des PP. Im 50/100-Szenario ist es eine für das Rezyklat besonders ungünstige Allokation, da hierbei 100 % der CO<sub>2</sub>-Emissionen aus der Verbrennung des PP zulasten des Rezyklats gerechnet werden. Gleichwohl zeigen die Ergebnisse, dass selbst unter sehr ungünstigen Annahmen die Verwendung von rezykliertem PP zumindest keine höheren Umweltauswirkungen verursacht als die Verwendung von PP-Neuware. Im 50/50-Szenario liegt das THG-Potenzial des Rezyklateimers mit

1,33 kg CO<sub>2eq</sub> pro FE fast gleichauf mit dem Basisszenario, während sich das THG-Potenzial des Rezyklateimers im 50/100-Szenario auf dem Niveau der Neuwaren-Variante befindet. Aus diesem Grund ist die Nutzung von Kunststoffrezyklaten aus ökologischer Perspektive in jedem Fall vorteilhaft.

Aus ökonomischer Sicht ist der Rezyklateinsatz der Nutzung von Neuware bisher noch nicht ebenbürtig, sofern nur die jeweiligen Marktpreise für den Rohstoff in Betracht gezogen werden. Das hier betrachtete Fallbeispiel zeigt jedoch, dass es durchaus möglich ist, Rezyklate für geeignete Anwendungsgebiete wirtschaftlich einzusetzen. Im Rahmen der Kostenanalyse wird erkennbar, dass unterschiedliche Einkaufspreise der beiden Rohstoffe der einzige variable Kostenfaktor in der Produktion eines Eimers aus recyceltem PP im Vergleich zu einem Eimer aus primärem PP sind. Der Einkaufspreis hat im betrachteten Fallbeispiel einen Anteil an den gesamten spezifischen Produktionskosten von 54 % für recyceltes PP und 62 % für primäres PP. Alle weiteren Betriebskosten können als identisch hoch („ceteris paribus“) angenommen werden. Da die Verwendung hochwertiger Rezyklate zudem keine Investitionen in neue Spritzgießmaschinen erfordert, fallen bei der Umstellung auf die Nutzung von Rezyklaten keinerlei gesonderte Investitionskosten an. Allerdings kann der Einsatz von speziellen Rezyklaten wie Ocean Based Recycled Plastics (OBRP) zu einem erhöhten Wartungsaufwand für Spritzgussformen – und so zu zusätzlichen Kosten – führen. An Produktionsstandorten für Lebensmittelverpackungen sollte darauf geachtet werden, die Produktionslinien für rezyklatbasierte Produkte räumlich zu trennen, da diese – zumindest im derzeitigen Rechtsrahmen – ausschließlich für Non-Food-Produkte zugelassen sind.

Auf Grundlage der Ergebnisse dieser Studie können Unternehmen die Verwendung von Rezyklaten als Beitrag zur Reduktion der Ressourceninanspruchnahme und zum Klimaschutz hervorheben. Auch wenn PP-Rezyklate aufgrund ihrer überwiegend fossilen Rohstoffbasis nicht als „klimaneutral“ bezeichnet werden können, ermöglicht ihre Verwendung einen deutlichen Beitrag zur Reduktion des Treibhausgaspotenzials von

Verpackungen – insbesondere, wenn rezyklatbasierte Verpackungen funktionell gleichwertig zu Verpackungen aus Neuware sind. In dem Fall können Verpackungen aus Primär-PP substituiert werden, wodurch wiederum die Inanspruchnahme fossiler Rohstoffe wie Erdöl verringert wird.

Die vorliegende Studie besteht aus insgesamt fünf Kapiteln und beschreibt zu Beginn den Untersuchungsgegenstand sowie die Ziele und Forschungsfragen. Kapitel 2 gibt im Anschluss eine zusammenfassende Einführung in die aktuelle Marktentwicklung und den Stand der Technik des Kunststoffrecyclings von gemischten Leichtverpackungen aus Haushalts-sammlungen. Darüber hinaus werden die politischen und regulatorischen Trends im Zusammenhang mit der angestrebten Kreislaufwirtschaft erläutert und verschiedene Lösungsansätze für die Herausforderungen bei der Verwendung von Rezyklaten dargestellt. Kapitel 3 setzt sich mit dem in der Fallstudie betrachteten Produkt auseinander und erläutert die für die ökologische Vergleichsrechnung und die ökonomische Bewertung verwendete Methode. Die Ergebnisse der vergleichenden Lebenszyklus-, der Kosten- und Sensitivitätsanalyse lassen sich anschließend in Kapitel 4 nachvollziehen. Das abschließende fünfte Kapitel zieht ein Fazit aus den gewonnenen Ergebnissen und gibt Empfehlungen zur Verbesserung der praktischen Anwendbarkeit von Rezyklaten. Es richtet sich insbesondere an kleine und mittlere Unternehmen der kunststoffverarbeitenden Industrie, die einen Einstieg in die Verwendung von Rezyklaten erwägen.

## 1 EINLEITUNG

### 1.1 Die Nutzung rezyklierter Kunststoffe zur Herstellung neuer Verpackungen

Kunststoffe sind vielseitige Werkstoffe mit hervorragenden Verarbeitungs- und Gebrauchseigenschaften. Eines der wichtigsten Einsatzgebiete für Kunststoffmaterialien wie Polypropylen (PP), Polyethylen (PE) und Polyethylenterephthalat (PET) sind Verpackungen. Das universell formbare Material schützt die Produkte, gewährleistet die Transportsicherheit sowie eine effiziente Logistik und ermöglicht eine ansprechende Präsentation der Ware.

In Deutschland belief sich der Kunststoffverbrauch für Verpackungen auf 3,17 Mio. Tonnen im Jahr 2020.<sup>4</sup> Im Jahr zuvor waren 3,16 Mio. Tonnen Kunststoffverpackungen (> 95 % der auf den Markt gebrachten Menge) als Abfall erfasst worden (der Verbleib der restlichen 5 % ist nicht bekannt).<sup>5</sup> Von den im Jahr 2020 erfassten Verpackungsabfällen aus Kunststoff wurden 1,91 Mio. Tonnen stofflich verwertet. Die Mengen an nicht stofflich verwerteten Kunststoffabfällen sind mit über 1,24 Mio. Tonnen pro Jahr weiterhin erheblich. Diese Abfälle werden bisher der energetischen Verwertung zugeführt.

Vor dem Hintergrund einer von der EU bis 2050 angestrebten Klimaneutralität<sup>6</sup> und der Transformation zur Kreislaufwirtschaft bis 2030 wird eine weitgehende stoffliche Verwertung von Kunststoffabfällen immer wichtiger. Die Verwendung rezyklierter Kunststoffe stellt eine in der Industrie stetig stärker nachgefragte Möglichkeit dar, den Carbon Footprint von Produkten zu reduzieren. Da der in Kunststoffen enthaltene Kohlenstoff durch eine stoffliche Verwertung vorerst nicht als CO<sub>2</sub> freigesetzt wird, leistet Recycling somit einen Beitrag zum Klimaschutz. Der Circular Economy

---

<sup>4</sup> Vgl. GVM (2021), S. 15.

<sup>5</sup> Vgl. Lindner, C. et al. (2020), S. 18.

<sup>6</sup> Vgl. Europäische Kommission (2018).

Action Plan der EU<sup>7</sup> formuliert unterdessen ambitionierte Ziele für die stoffliche Verwertung von Verpackungen aus Kunststoff (vgl. Kapitel 2.4):

- So sollen (übertrieben aufwändige) Verpackungen zur Verminderung von Verpackungsabfällen verringert werden.
- Verpackungen sollen so gestaltet werden (Design für Recycling), dass sie wiederverwendbar und recyclingfähig sind, z. B. durch Verringerung der Materialvielfalt.
- Die Nutzung von Rezyklaten soll gesteigert werden.

Gemäß Deutschem Verpackungsgesetz von 2019 soll für Leichtverpackungen (LVP) ab 2022 eine Recyclingquote von mindestens 63 % erreicht werden. Obwohl die Quoten bei Verpackungskunststoffen laut der Gesellschaft für Verpackungsmarktforschung (GVM) in den letzten Jahren gestiegen sind (von 52,7 % im Jahr 2000 auf 60,5 % in 2020)<sup>8</sup>, bleibt eine möglichst hochwertige werkstoffliche Verwertung der Kunststoffabfälle weiterhin eine Herausforderung. Der Branchenverband der Hersteller von Kunststoffverpackungen<sup>9</sup> hat sich zum Ziel gesetzt, bis 2025 jährlich mindestens 1 Mio. Tonnen Kunststoffrezyklate einzusetzen, davon mehr als drei Viertel der Menge Post-Consumer-Rezyklate (PCR).<sup>10</sup> Für kunststoffverarbeitende Unternehmen (Compound-Herstellende) stellt sich hier insbesondere die Frage, wie sie angesichts neuer regulatorischer Anforderungen und Branchentrends ihre Produktion auf den vermehrten Einsatz von Kunststoffrezyklaten einstellen können.

Aus LVP-Abfällen gewonnene PET-Rezyklate (insbesondere Flaschen-PET) können bereits in einem geschlossenen Kreislauf geführt werden. Die stoffliche Verwertung von Kunststoffen aus gemischten LVP-Abfällen ist deutlich anspruchsvoller. Teilweise besitzen diese Kunststoffrezyklate ei-

---

<sup>7</sup> Vgl. Europäische Kommission (2020).

<sup>8</sup> Vgl. GVM 2021.

<sup>9</sup> Hierbei handelt es sich um die IK Industrievereinigung Kunststoffverpackungen e.V.

<sup>10</sup> Vgl. Schmidt, I. (2022).

ne geringere Qualität als die aus Erdöl erzeugte Neuware oder eine geringere Liefersicherheit.<sup>11</sup> Kunststoffrezyklate geringerer Qualität eignen sich für einfache Anwendungen wie z. B. in Form von Parkbänken oder Rasengittern.<sup>12</sup> Dieser auch als Downcycling bezeichneten Praxis steht die zunehmende Nachfrage von Kunststoffrezyklaten für hochwertige Anwendungen – und damit höherer Qualität – im Verpackungssektor gegenüber.

Technische Innovationen und zunehmendes Know-how in der Recyclingbranche und der kunststoffverarbeitenden Industrie haben mittlerweile zu einer deutlich verbesserten Qualität und Verfügbarkeit von Rezyklaten aus LVP-Abfällen beigetragen. Dies eröffnet neue Möglichkeiten zur hochwertigen stofflichen Verwertung von Rezyklaten für die erneute Herstellung von Verpackungen – auch solchen mit hohen Anforderungen an Maßhaltigkeit und mechanische Eigenschaften. Kunststoffverarbeitende Unternehmen können heute bereits auf eine breite Palette von Rezyklatwerkstoffen zugreifen, um die zunehmende Nachfrage nach Produkten mit Rezyklatanteil zu bedienen. Dieser Trend wird sich zukünftig voraussichtlich noch verstärken, da die Etablierung einer Kreislaufwirtschaft (Circular Economy) sowohl politisch vorangetrieben als auch gesellschaftlich gewünscht wird.<sup>13</sup>

Vor dem Hintergrund dieser Entwicklungen stellt sich für kunststoffverarbeitende Unternehmen die Frage, ob und wie sich Kunststoffrezyklate für ihre jeweiligen Produktionsprozesse nutzen lassen. Diese Studie gibt einen praxisrelevanten Überblick zu ökologischen und ökonomischen Aspekten der Nutzung von Kunststoffrezyklaten für die Herstellung hochwertiger Verpackungsprodukte sowie Empfehlungen für Betriebe der Kunststoffverarbeitung.

---

<sup>11</sup> Vgl. Jetzke, T. und Richter, S. (2020), S. 1.

<sup>12</sup> Vgl. Verein Deutscher Ingenieure e.V. (2021).

<sup>13</sup> Vgl. EU-Kommission (2018).

## 1.2 Untersuchungsgegenstand

Die vorliegende Studie vergleicht anhand eines Fallbeispiels aus der industriellen Fertigung zwei konkrete kunststoffbasierte Verpackungsvarianten, die einerseits aus einem erdölbasierten Primärkunststoff und andererseits mit einem Anteil an rezykliertem Kunststoff hergestellt werden können. Beide Produkte zeichnen sich dabei durch gleichwertige Eigenschaften hinsichtlich Qualität und Toleranzbereiche bezüglich der Maßhaltigkeit und Verarbeitungseigenschaften der eingesetzten Werkstoffe aus. Kunststoffneuware und Kunststoffrezyklate unterscheiden sich hauptsächlich in Farbe und Geruch.

Im Rahmen der Studie werden die spezifischen, mit der Verwendung von Kunststoffrezyklaten im Zusammenhang stehenden Qualitätsaspekte detailliert erläutert. Dazu werden zunächst die gängigen Verfahren der Vorbereitung zur Wiederverwendung (Erfassung von Leichtverpackungsabfällen, Prozesse zur Sortierung und Herstellung der Kunststoffrezyklate) qualitativ beschrieben. Anschließend wird der Einfluss verschiedener Faktoren auf die Qualität der Kunststoffrezyklate dargelegt.

Hier wird insbesondere auf die Bedeutung der Quellen der zum Recycling genutzten Kunststoffabfälle für die Qualität der daraus erzeugten Kunststoffrezyklate eingegangen. In diesem Zusammenhang thematisiert die Studie sowohl technische als auch ökonomische Aspekte, die die bestehenden Herstellungsprozesse von Kunststoffverpackungen beeinflussen, wenn Primärkunststoffe durch Kunststoffrezyklate substituiert werden. Im weiteren Sinne zählen dazu auch Fragen der Marktakzeptanz von Verpackungen aus Kunststoffrezyklaten.

In einer Sensitivitätsanalyse wird ermittelt, welche ökologischen und ökonomischen Auswirkungen sich daraus für die Herstellungsverfahren der Kunststoffrezyklate selbst und die Verarbeitbarkeit der Kunststoffrezyklate im bestehenden Herstellungsprozess der gewählten Verpackungsart ergeben.

### 1.3 Ziele und Forschungsfragen der Studie

Die ökologische und ökonomische Vergleichsrechnung erfolgt anhand eines konkreten Anwendungsbeispiels von Kunststoffverpackungen aus Kunststoffneuware vs. Kunststoffrecycling. Im Einzelnen werden die untenstehenden Forschungsfragen untersucht:

- (1) Welcher Energiebedarf, ausgedrückt als Kumulierter Energieaufwand (KEA), ist den beiden Verpackungsvarianten über deren gesamten Lebensweg in Rechnung zu stellen?
- (2) Welcher Rohstoffverbrauch, ausgedrückt als Kumulierter Rohstoffaufwand (KRA), und welcher Wasserverbrauch sind den beiden Verpackungsvarianten über deren gesamten Lebensweg in Rechnung zu stellen?
- (3) Wie hoch ist das Treibhausgaspotenzial, ausgedrückt in CO<sub>2</sub>-Äquivalenten, der Verpackungsvarianten über deren gesamten Lebensweg?
- (4) Welcher Flächenbedarf (Waldflächen, Landwirtschaftsflächen, Siedlungs- und Verkehrsflächen, Brach- und Wasserflächen)<sup>14</sup> ist bei der Herstellung der betrachteten Verpackungsvarianten zu berücksichtigen?
- (5) Welche Kosten ergeben sich für die Herstellung der betrachteten Verpackungsvarianten?

Neben der Klärung der oben genannten Forschungsfragen beinhaltet die Studie auch Empfehlungen für kunststoffverarbeitende kleine und mittlere Unternehmen (KMU), die einen Einstieg in die Nutzung von Kunststoffrecycling erwägen. So hilft diese Studie anhand eines Fallbeispiels dabei, die wirtschaftlichen Aspekte unter Berücksichtigung der Marktpreise für recycelte Kunststoffe zu bewerten.

---

<sup>14</sup> Vgl. VDI 4800 Blatt 2:2018-03.



## 2 SACHSTAND UND PERSPEKTIVEN DES KUNSTSTOFFRECYCLINGS

### 2.1 Marktrelevanz und Markttrends im Kunststoffrecycling und Diskussion der Chancen und Herausforderungen

#### 2.1.1 Quantität und Qualität von Kunststoffabfällen und Rezyklaten

##### Mengen von Kunststoffverpackungsabfällen

Im Jahr 2021 betrug der gesamte Kunststoffverbrauch in Deutschland 12,4 Mio. t. Davon wurden 3,2 Mio. t Kunststoffe für die Herstellung von Verpackungen eingesetzt. Da es sich bei Verpackungen um kurzlebige Produkte handelt, fielen im gleichen Jahr mehr als 98 % der hergestellten Verpackungen wieder als Abfall an. Bezogen auf das gesamte Post-Consumer-Abfallaufkommen beläuft sich der Anteil an Verpackungsabfällen auf 59 % bzw. 3,2 Mio. t. Insgesamt betrug das Abfallaufkommen an Kunststoffen im Jahr 2021 5,67 Mio. t, wobei der Anteil an Post-Consumer-Abfall mit 5,44 Mio. t – im Vergleich zum Post-Industrial-Abfall mit 0,23 Mio. t – deutlich überwiegt.<sup>15</sup>

##### Rezyklatmengen

Im Jahr 2021 wurden insgesamt 2,3 Mio. t Kunststoffrezyklat in Deutschland verarbeitet. Dies entspricht einem Anteil von 16,3 % an der Gesamtmenge an verarbeiteten Kunststoffen. Verglichen zu 2019 hat sich die Einsatzmenge von Rezyklat damit um etwa 0,34 Mio. t erhöht. 29 % der Gesamtmenge der produzierten Rezyklate wurden im Verpackungsbereich eingesetzt. Höhere Rezyklateinsatzquoten wurden nur im Bau (ca. 40 %) erzielt, niedrigere u. a. in der Landwirtschaft (ca. 11 %), in der Fahrzeug- (ca. 3 %) und der Elektrobranche (ca. 2 %).<sup>16</sup>

---

<sup>15</sup> Vgl. Lindner, C. et al. (2022), S. 16 f.

<sup>16</sup> Vgl. Lindner, C. et al. (2022), S. 18 ff.

Der Einsatz von recyceltem Kunststoff in Verpackungen könnte laut GVM (2020) auf circa 0,96 Mio. t pro Jahr angehoben werden. Bis zum Jahr 2025 will die kunststoffverarbeitende Industrie 1 Mio. t Rezyklate einsetzen.<sup>17</sup> Dass es sich hierbei nicht nur um eine theoretische Prognose handelt, spiegelt sich auch in der Nachfrage nach Rezyklaten wider. Zwischen 2017 und 2019 ist diese um knapp 20 % gestiegen.<sup>18</sup>

### **Qualität von Kunststoffabfällen**

Im Gegensatz zur Ermittlung der Quantitäten ist die Darlegung hinsichtlich der Qualität der Kunststoffabfälle deutlich schwieriger. Grundsätzlich hat die Zusammensetzung der Kunststoffabfälle großen Einfluss auf die daraus hergestellten Rezyklate. Je sortenreiner und störstofffreier eine Abfallfraktion ist, desto einfacher wird es, daraus hochwertige Rezyklate herzustellen. Aufgrund dieser Tatsache ist die Herkunft des Abfalls (Post-Consumer oder Post-Industrial) ein erstes Indiz hinsichtlich Qualitätsfragen. So sind Abfälle aus dem gelben Sack in der Regel deutlich verunreinigter und heterogener als industrielle Abfälle.<sup>19,20</sup> Ein hoher Anteil an vermischten unterschiedlichen Kunststoffsorten und Farben (insbesondere Schwarz) sowie Verbundwerkstoffen (vermehrte untrennbare Schichten verschiedener Materialien) verkomplizieren die Erkennung und Trennung der Kunststoffabfälle im Sortier- und Verwertungsprozess. Deshalb sind gemischte LVP-Abfälle aus privaten Haushalten (Post-Consumer) bislang nicht vollständig stofflich verwertbar.

### **Qualität von Rezyklaten**

Bis ins Jahr 2022 waren einheitliche Qualitätsstandards für Kunststoffrezyklate in der kunststoffverarbeitenden Industrie noch nicht allgemein etabliert. Im Gegensatz zu Kunststoffneuware, deren technische Spezifikationen für die Anwendenden klar ersichtlich sind, weist die Qualität von

---

<sup>17</sup> Vgl. IK Industrievereinigung Kunststoffverpackungen e.V. (2022), S. 1.

<sup>18</sup> Vgl. Scheuermann, A. (2021).

<sup>19</sup> Vgl. Bendix, P. et al. (2021), S. 75.

<sup>20</sup> Vgl. EU-Recycling (2020).

Rezyklaten in der Regel Schwankungen auf. Ein Grund hierfür ist, dass die Zusammensetzung der Inputmaterialien des Recyclings, vor allem Post-Consumer-LVP-Abfälle, von regionalen und saisonalen Unterschieden gekennzeichnet ist. Aus diesem Grund sind die Eigenschaften der am Markt angebotenen Rezyklate variabel und ihre Nutzung erfordert jeweils eine Eignungsprüfung.

Die fehlende Konstanz der Werkstoffeigenschaften kann wiederum Probleme in der Maschinenführung und Produktqualität verursachen. Hieraus resultiert für verarbeitende Unternehmen ein zusätzlicher Aufwand für das Monitoring und ggf. die Nachjustierung der Prozessparameter an den Spritzgussmaschinen. Schwankungen hinsichtlich der Rezyklateigenschaften lassen sich im Zuge der Qualitätskontrolle beim Wareneingang erkennen, sodass Verarbeitungsparameter (z. B. Temperatur und Beimischung von Neuware) chargenweise nachjustiert werden können. Bei minderwertigen Rezyklaten muss ggf. die Wandstärke der zu produzierenden Verpackungseinheiten (bspw. Farbeimer inklusive Deckel) erhöht werden. Diese Anpassung kann sich im Weiteren ungünstig auf die mechanischen Eigenschaften auswirken. Vor diesem Hintergrund ist die Beschaffung großer Chargen von Rezyklaten kostengünstiger, da sich der Aufwand für die Qualitätssicherung damit relativiert. Besonders für hochwertige Zielanwendungen kommt es daher auf eine langfristig stabile Verfügbarkeit von Rezyklaten mit definierten Eigenschaften innerhalb vorab festgelegter Toleranzbereiche an. In der Praxis arbeiten kunststoffverarbeitende Unternehmen eng mit ihren Zuliefernden zusammen, um die Qualität der verwendeten Rezyklate an die individuelle Zielanwendung anzupassen.

Das Informationsangebot der verschiedenen Rezyklatanbieter und -anbieterinnen variiert jedoch stark. Es mangelt an einer vereinheitlichten Art und Weise, welche Informationen über die technischen Parameter der Rezyklate an Marktteilnehmende kommuniziert werden. Ein weiteres Problem besteht darin, dass die technischen Spezifikationen der Rezyklate, die von dem oder der Zuliefernden zur Verfügung gestellt werden, nicht immer so interpretiert werden können, dass sie den Anforderungen der

vorgesehenen Zielanwendungen entsprechen. Somit können Rezyklate unterschiedlicher Qualitäten und Preise zur Anwendung kommen.

Aufgrund mangelnder Standards gilt es für die Verarbeitenden, den Anwendungsfall jeweils einzeln zu prüfen, und zwar für Neuware und Rezyklate gleichermaßen. Bei Letzteren ist jedoch die Frage, ob die Qualität den Anforderungen des Verarbeitungsprozesses und der Zielanwendung genügt, schwieriger zu beantworten als im Fall von Neuware. Schließlich kann die exakte Qualität von Rezyklaten nur in Kombination mit der Spezifikation des Produkts definiert werden, für das die Rezyklate eingesetzt werden sollen.

Ähnlich wie im Fall von Neuware werden die Eigenschaften von Rezyklaten anhand physikalisch-technischer Parameter spezifiziert. Diese umfassen allgemeine Informationen wie Form und Geometrie des Rezyklats oder den geeigneten Verarbeitungsprozess. Darüber hinaus werden Angaben zu physikalischen Eigenschaften wie Dichte oder Schmelzflussindex gemacht. Weitere wichtige Parameter zur Qualitätsbestimmung sind Optik und mechanische Eigenschaften wie Elastizität sowie Schlagzähigkeit. Im Vergleich zu Neuware ist bei Rezyklaten die Herkunftskennzeichnung (Post-Consumer vs. Post-Industrial) von besonderer Bedeutung, da sich hieraus bereits erste Hinweise auf die Qualität ableiten lassen. Geruch ist eine typische Eigenschaft von Polyolefin-Rezyklaten aus Post-Consumer-LVP-Abfällen, der sich deutlich von Neuware unterscheidet. Die am Markt derzeit verfügbaren hochwertigen Rezyklate weisen nur noch einen leichten Geruch auf, der bei Belüftung des Endprodukts schnell verfliegt. Bei Rezyklaten geringerer Qualität ist in der Regel mit einem intensiven Geruch zu rechnen. Somit hängt es von der Zielanwendung ab, als wie relevant sich einzelne Aspekte für die Endzielgruppe darstellen.

Tabelle 1 gibt eine Übersicht zu den zahlreichen Parametern (inkl. Prüfnormen/Prüfverfahren), anhand derer sowohl Kunststoffneuware als auch Rezyklate beschrieben werden können.

Tabelle 1: Überblick der materialspezifischen Prüfstandards für PE und PP<sup>21</sup>

Eigenschaft	Prüfverfahren	PE	PP
Ursprüngliche Verwendung	Vom Lieferanten anzugeben		
Form	Sichtprüfung	M	M
Rezyklatgehalt	EN 15343		O
Farbe	Sichtprüfung	M	M
Teilchengröße	ISO 22498	M	
Korngrößenverteilung	Normspezifisches Verfahren		
Schüttdichte	Normspezifisches Verfahren	M: Anhang B	O: Anhang A
Dichte	EN ISO 1183	O	M: EN ISO 1183-1 oder Verfahren A
Feinkornanteil	Normspezifisches Verfahren		
Filtrationsgrad	Maschenweite	O	O
Filtrierfähigkeit	Normspezifisches Verfahren		
Schmelze-Massen-Fließrate	EN ISO 1133	M	M: EN ISO 1133, Bedingung M
Trockenfließrate	EN ISO 6186		
Vicat-Erweichungstemperatur	EN ISO 306		
Wärmebeständigkeit	ISO 182-1, EN ISO 182-2, -3, -4		
Vorhandensein von Fremdpolymeren	Fourier transform Infrarot oder differential scanning calorimeter	M (Vorhandensein von PP und Fremdpolymeren)	O
Vorhandensein modifizierter Zusätze	Vom Lieferanten anzugeben		
Fremdstoffe	Normspezifisches Verfahren		
Verunreinigungen	Normspezifisches Verfahren	O: Verfahren A, B, C oder D	Verunreinigungen
Gehalt an flüchtigen Bestandteilen	Normspezifische Vorgabe		O: EN 12099 oder eine andere
Wassergehalt/Restfeuchte	DIN EN ISO 15512:2019-09	O	
Schlagfestigkeit	EN ISO 179-1, -2, EN ISO 180	O	M
Streckspannung	EN ISO 527-1 oder -2	O	O

<sup>21</sup> Vgl. Endres, H.-J. und Shamsuyeva, M. (2020).

**Tabelle 1: Überblick der materialspezifischen Prüfstandards für PE und PP (Weiterführung)**

Eigenschaft	Prüfverfahren	PE	PP
Bruchdehnung	EN ISO 527-1 oder -2	O	O
Biegeeigenschaften	EN ISO 178		O
Härte	ISO 868		
Aschegehalt	DIN EN ISO 3451	O	O
PVC-Gehalt	Normspezifisches Verfahren		
Polyolefin-Gehalt	Normspezifisches Verfahren		
Grenzviskosität	ISO 1628-5		
Alkalität	Normspezifisches Verfahren		

(M = notwendige Angabe; O = freiwillige Angabe; keine Angabe = leere Zelle)<sup>22</sup>

Um hochwertige Rezyklate herstellen zu können, gibt es mehrere Möglichkeiten. Einerseits können technische Verbesserungen im Sortier- und Trennprozess die Qualität der aus LVP-Abfällen erzeugten Rezyklate verbessern. Dies erfordert jedoch weitere verfahrenstechnische Innovationen und erhebliche Investitionen. Eine andere Möglichkeit wäre es, die Materialvielfalt bei Leichtverpackungen so zu reduzieren, dass die Sortenreinheit des Inputmaterials, also der erfassten LVP-Kunststoffabfälle, verbessert würde. Produktherstellende können hierbei einen entscheidenden Beitrag leisten, indem sie die Recyclingfähigkeit ihres Produktes bereits im Entwicklungsprozess bedenken (Design for Recycling). Dies erfordert jedoch regulatorische Maßnahmen, wie sie im Rahmen des Circular Economy Action Plan der EU teilweise bereits vorgesehen sind. Das kann beispielsweise durch die Minimierung der Materialvielfalt bis hin zu monomaterialien Lösungen oder mittels Reduktion der eingesetzten Farbstoffe bzw. anhand eines neugedachten Farbkonzeptes geschehen.<sup>23</sup>

Auch im Hinblick auf das Verpackungsgesetz und die darin verankerte Kunststoffabgabe lohnt es sich für Unternehmen, die Recyclingfähigkeit ihrer Produkte voranzubringen. Seit dem 1. Januar 2021 ist die Plastik-

<sup>22</sup> Vgl. Endres, H.-J. und Shamsuyeva, M. (2020).

<sup>23</sup> Vgl. Bendix et al. (2021), S. 163.

Abgabe in den EU-Ländern umzusetzen. Weitere Details werden in Kapitel 2.4.4 erläutert.

### **Konsortialstandard DIN SPEC 91446**

Für die Beurteilung der Qualitäten von am Markt verfügbaren Kunststoffrezyklaten können sich die am Markt Beteiligten entlang der Wertschöpfungskette an der Ende 2021 publizierten DIN SPEC 91446 „Klassifizierung von Kunststoffrezyklaten durch Datenqualitätslevel für die Verwendung und den (internetbasierten) Handel“ orientieren.<sup>24</sup> Dieser Konsortialstandard<sup>25</sup> ermöglicht eine konsistente B2B-Kommunikation über die Qualitäten von Kunststoffrezyklaten, beispielsweise zwischen Recyclingunternehmen und Herstellenden von Compounds. Die in der Norm definierten Datenqualitätslevel beschreiben eine Vorgehensweise für die Spezifikation von Inputströmen sowie die Berechnung des Rezyklatgehalts. Eine Datenblattvorlage definiert die einheitliche Beschreibung von Datenqualitätslevels (DQL) für drei Kategorien von Rezyklateigenschaften:

- Information (I): Merkmale des Sammel-, Handhabungs- und/oder Verwertungsprozesses.
- Properties (P): Merkmale, die durch eine Prüfung nach einer öffentlich zugänglichen und festgelegten Norm ermittelt wurden.
- Optional Characteristics (O): Freiwillige Angaben zu kunststoffspezifischen technischen Eigenschaften.

Auf Basis dieser standardisierten Deskriptoren lässt sich für die Kunststoffverarbeitenden leichter beurteilen, ob ein Rezyklatkunststoff für einen bestimmten Anwendungszweck geeignet sein könnte.

---

<sup>24</sup> Vgl. DIN SPEC 91446.

<sup>25</sup> Ein Konsortialstandard ist eine im Schnellverfahren entwickelte Richtlinie, die nicht der für Standards sonst üblichen Normungsprozedur (Konsenspflicht) unterzogen wurde. Die DIN SPEC nach dem PAS-Verfahren (PAS = „Publicly Available Specification“) sind kostenlos verfügbar.

Trotz dieser neu etablierten Norm zur Beschreibung der Rezyklateigenschaften ist ein Informationsaustausch zwischen Anbietenden von Rezyklaten und Kunststoffverarbeitenden in der Praxis nach wie vor unabdingbar. Mit einem guten Verständnis der Anwendungszwecke und Verarbeitungsprozesse der Kundschaft können Rezyklatanbietende eine langfristig stabile Qualität der jeweiligen Produktlinie bewerkstelligen.

### **Umweltzeichen und Zertifikate für Produkte und Anwendende von Rezyklaten**

Das Umweltzeichen DE-UZ 30a „Blauer Engel für Produkte aus Recycling-Kunststoffen“ kann für Produkte mit einem Mindestanteil von 80 Gewichtsprozent Recyclingkunststoff (Post-Consumer-Rezyklat) verwendet werden.<sup>26</sup> Es informiert Endverbraucher ebenso wie gewerbliche Kundschaft und die öffentliche Beschaffung über ökologische Vorteile der damit gekennzeichneten Produkte. Mit der Vergabe des Blauen Engels soll der Absatz von Erzeugnissen aus Recyclingkunststoffen gefördert werden, um somit auch eine Stärkung der stofflichen Wiederverwertung von Post-Consumer-Abfällen zu erreichen.

Die Erlaubnis zur Verwendung des Umweltzeichens Blauer Engel 30a kann bei der RAL gGmbH für Fertigerzeugnisse, die zu mindestens 90 % aus Kunststoff bestehen<sup>27</sup>, beantragt werden. Unter den Geltungsbereich dieses Umweltzeichens fallen beispielsweise folgende Typen von Fertigerzeugnissen:

- Büroartikel (z. B. Briefablagen/Schubladenboxen),
- Abfall- und Wertstoffbehälter,
- Kunststoffeimer, -töpfe und -behälter und Gießkannen,

---

<sup>26</sup> Vgl. Umweltbundesamt (2019).

<sup>27</sup> Ausnahmen sind Produkte mit Metallteilen (z. B. Tragebügel bei Eimern, Stahlarmierungen oder Radsysteme bei Tonnen). Diese Komponenten werden nicht zum 90 %-Kunststoffanteil gerechnet.



- Sitzgruppen o. Ä. für den Außenbereich,
- Palisaden, Zäune, Rasengitter und Spielplatzausstattung,
- Kompostsilos und Komposter,
- Folienprodukte.

Verkaufsverpackungen aus Kunststoff sowie Verbundverpackungen sind jedoch vom Geltungsbereich ausgeschlossen.

Bei der Antragstellung muss nachgewiesen werden, dass das jeweilige Produkt die Vergabekriterien für das DE-UZ 30a erfüllt.<sup>28</sup> Die Vergabevorschrift stellt neben der Vorgabe eines Mindestanteils von 80 % Recyclingkunststoff auch Anforderungen an die Begrenzung des Schadstoffgehalts der Fertigprodukte. Insbesondere dürfen PCR-Materialien nicht mehr als 0,1 % von besonders besorgniserregenden Substanzen (SVHC) enthalten, die in der REACH-Kandidatenliste verzeichnet sind. Ebenfalls halogenierte Treib- oder Flammschutzmittel sowie cadmium- und bleihaltige Additive und Weich-PVC sind nicht zulässig. Auch andere, gemäß Anhang VI der CLP-Verordnung als gefährlich eingestufte Substanzen (für die es Gefahrenvermerke (H-Sätze) gibt) dürfen den PCR-Materialien nicht beigegeben sein. Ferner legt die Vergabevorschrift Grenzwerte für die Freisetzung von Schwermetallen aus den Erzeugnissen in die Umweltmedien (Gewässer, Böden) fest.

Für die Zeichenvergabe muss im Zuge der Antragsstellung nachgewiesen werden, dass die Anforderungen der Vergabevorschrift eingehalten werden. Dazu gehört unter anderem ein EuCertPlast-Zertifikat<sup>29</sup> über die Herkunft der verwendeten Kunststoffrezyklate. Die eingereichten Nachweise werden durch eine unabhängige fachkundige Stelle am Ort der Produktion geprüft und als Prüfbericht dokumentiert. Nach erfolgter Zeichenvergabe ist eine jährlich einzureichende Bestätigung der Rezyklatelieferkette erforderlich. Zudem ist die Qualität der verwendeten Rezyklate durch

---

<sup>28</sup> Vgl. RAL gGmbH (2019).

<sup>29</sup> Vgl. Plastics Recyclers Europe (2018).

stichprobenhafte Laboranalysen sicherzustellen und anhand entsprechender Prüfberichte zu belegen.

Ein weiteres Gütezeichen zur Kennzeichnung von Produkten mit Rezyklatanteil ist das „RAL-GZ 720, % Recycling Kunststoff“. Es kann für Produkte verwendet werden, die „Rezyklate aus haushaltsnahen Wertstoffsammlungen“<sup>30</sup> enthalten. Das Gütezeichen garantiert eine durchgängige Herkunftssicherung der Rezyklate über alle Stadien des Recyclingprozesses von Post-Consumer-LVP-Abfällen. Das Recht zur Nutzung des Kennzeichens kann nach Beitritt zum RAL Gütegemeinschaft Rezyklate aus haushaltsnahen Wertstoffsammlungen e.V. auf Basis der Güte- und Prüfbestimmungen über den prozentualen Anteil an Rezyklaten erworben werden.<sup>31</sup>

Für Unternehmen, die Rezyklate einsetzen, ist die ISCC-Zertifizierung (International Sustainability and Carbon Certification) eine Option. ISCC ist ein unabhängiges, international anerkanntes Zertifizierungssystem für den Herkunftsnachweis von industriell genutzten Rohstoffen über deren gesamte Wertschöpfungskette.<sup>32</sup> Ursprünglich entwickelt für die Zertifizierung von Biomasse, unterstützt ISCC nun auch die stoffliche Verwertung von Kunststoffen im Einklang mit den Zielen der Kreislaufwirtschaft. Die Zertifizierung garantiert nach ISCC PLUS eine geprüfte Materialherkunft, indem eine vollständige Rückverfolgbarkeit der Rezyklate entlang der gesamten Recycling- und Lieferkette sichergestellt wird. Unter dem ISCC PLUS-Zertifikat lässt sich die Verwendung aller nichtbiologischen kohlenstoffbasierten Materialien, recycelten Abfälle und Reststoffe zertifizieren. Es deckt sowohl Pre- als auch Post-Consumer-Abfälle ab.

Das ISCC PLUS-Zertifikat dient vor allem als Instrument in der B2B-Kommunikation mit Geschäftspartnern und -partnerinnen sowie Stakeholdern und Stakeholderinnen. Die Nutzung des Zertifikats erfolgt unter

---

<sup>30</sup> RAL gGmbH (2020).

<sup>31</sup> Vgl. RAL gGmbH (2020).

<sup>32</sup> Vgl. ISCC (2022).

Einhaltung der ISCC-Anforderungen.<sup>33</sup> Unternehmen, die das ISCC-Logo oder ISCC-Claims verwenden wollen, müssen zuvor eine Genehmigung vom ISCC erwerben.

Entsprechend den spezifischen Anforderungen von Seiten der Kunststoffverarbeitung bietet die Zertifizierung nach ISCC PLUS zwei Chain-of-Custody-Optionen:

- **Zertifizierte Getrennthaltung (Physical Segregation):** Das zertifizierte Produkt muss Rezyklatkunststoff aus nachvollziehbaren Quellen enthalten. Die Rezyklate werden über die gesamte Wertschöpfungskette hinweg physisch von Neuware separiert. Die physische Trennung ermöglicht klare Aussagen zum Rezyklatgehalt, die sich direkt auf die Herkunft beziehen, z. B. „das Produkt wird aus recyclingbasierten Rohstoffen hergestellt, die nach dem ISCC-Standard zertifiziert sind“<sup>34</sup>.
- **Massenbilanzmethode:** Produkte können eine Mischung aus neuen und rezyklierten Kunststoffen enthalten. Zertifiziert wird der garantierte Anteil an rezyklierten Kunststoffen, um eine doppelte Anrechnung zu vermeiden.

Bei beiden Optionen muss für alle ausgehenden Materialien eine Nachhaltigkeitserklärung ausgestellt werden. Zertifikatsinhabende müssen sicherstellen, dass alle ein- und ausgehenden Lieferdokumente die notwendigen Informationen gemäß den ISCC-Anforderungen enthalten.

### 2.1.2 Preisentwicklung von Neuware und Rezyklaten

Bei Aussagen über die Preisentwicklung von Rezyklaten gilt es, zwischen Sekundäranwendungen (z. B. Rohre aus PE-Rezyklat) und Verpackungsanwendungen zu unterscheiden.

---

<sup>33</sup> Vgl. ISCC (2022).

<sup>34</sup> ISCC (2022).

Bei Sekundäranwendungen<sup>35</sup> waren die Rezyklatpreise lange an die Primärrohstoffpreise gekoppelt. Als grobe Orientierung für den Marktpreis von Rezyklaten galt bisher ein Wert in Höhe von etwa 80 % des Neuwarepreises. In den Jahren 2020 und 2021 kam es zu einem Einbruch der Rohölpreise. Dadurch entstand erstmalig ein Preisdruck auf die Recyclingbranche. Die zeitweise kostengünstigere Verfügbarkeit von Neuware setzte zahlreichen Recyclingunternehmen finanziell zu, weil die Nachfrage nach Rezyklaten aufgrund der niedrigen Preise für Neuware zurückging, während die weiterlaufenden Recyclingprozesse nicht mehr kostendeckend waren. Seit 2022<sup>36</sup> sind die Rezyklatpreise im Vergleich zu Neuware jedoch wieder gestiegen. Die weitere Entwicklung bleibt abzuwarten.

Die Marktpreise für hochwertige Rezyklate, z. B. für Verpackungsanwendungen, sind unterdessen nicht eingebrochen, weil die am Markt verfügbaren Mengen die Nachfrage kaum decken können. Dies liegt nicht zuletzt an der mangelnden Verfügbarkeit sortenreiner Kunststoffabfälle für das Recycling. Eine Verbesserung der Qualität von LVP-Kunststoffabfällen (z. B. durch recyclinggerechtes Verpackungsdesign) ist ein tendenziell langfristiger Trend, der aus aktueller Perspektive noch keine ausreichende Investitionssicherheit für die Aufbereitenden von Kunststoffabfällen bietet. Die Ungewissheit über die zukünftige Verfügbarkeit geeigneter Inputmaterialien stellt somit ein Hemmnis für die Vergrößerung der Aufbereitungskapazitäten und infolgedessen für die Marktverfügbarkeit hochwertiger Rezyklate dar.

PE-Rezyklate, die sich für Verpackungsanwendungen eignen, waren im Jahr 2020 auf einem Preisniveau von 300 EUR/t (Fraktion aus der Sortierung) angesiedelt. Der Preis fiel im Jahr 2021 auf 200 EUR/t. Im Jahr 2022 stiegen die Preise wieder an, teilweise auf über 500 EUR/t. Fachleute gehen davon aus, dass in den nächsten Jahren die Preise für Rezyklate in

---

<sup>35</sup> Anwendungsbereiche ohne hohe Qualitätsanforderungen an die Rezyklate sind beispielsweise Produkte wie Blumenkübel, Gartenmöbel, Rohre, Paletten usw.

<sup>36</sup> Stand: Oktober 2022.

High-End-Anwendungen wie Verpackungen auf das Drei- bis Vierfache von Neuware ansteigen werden.

Aus Perspektive kunststoffverarbeitender Unternehmen stellt sich die absehbare Preisentwicklung für hochwertige Rezyklate ebenso dar, wenn auch aus anderen Gründen.<sup>37</sup> Demzufolge wird sich die Nachfrage nach Rezyklaten zukünftig weiterhin erhöhen und in steigenden Marktpreisen widerspiegeln. Es ist davon auszugehen, dass die Rezyklatpreise zunächst auf hohem Niveau bleiben, da die Angebotsseite die Nachfrage nach hochwertigen Rezyklaten bis auf weiteres nicht in ausreichendem Maße bedienen kann. Aktuelle Investitionen in moderne Sortier- und Aufbereitungsanlagen werden voraussichtlich frühestens in zwei bis vier Jahren zu einem Sinken der Preise für Rezyklate führen.

Eine langfristige Prognose der Preisentwicklung von Rezyklaten ist jedoch nur schwer möglich. In diesem Kontext gilt es außerdem darauf hinzuweisen, dass auch staatliche Regularien – wie Rezyklatquoten für Getränkeflaschen – ebenso wie Selbstverpflichtungen produzierender Unternehmen zur Verwendung von Rezyklaten die Nachfrage nach hochwertigen Rezyklaten ankurbeln.

### 2.1.3 Verfügbarkeit und Beschaffung von Rezyklaten

Neben technischen und regulatorischen Anforderungen, die es zu erfüllen bzw. einzuhalten gilt, ist gegenwärtig die Verfügbarkeit von Rezyklaten ein limitierender Faktor (vgl. Kapitel 2.1.2). Im Folgenden sind zwei etablierte Beschaffungswege angeführt, um Rezyklate mit definierten Qualitätskriterien einzukaufen.

#### Herstellende von Rezyklaten, Compounds und Neuwaren

Viele Rezyklate sind inzwischen als typisierte Markenprodukte im Angebot und können über entsprechende Recyclingunternehmen und Herstellende

---

<sup>37</sup> Vgl. Schmitz, M.; Dengel, G.; Karsubke, H. (2022).

von Compounds direkt bezogen werden.<sup>38</sup> Zwar müssen Unternehmen, die Rezyklate einsetzen wollen, keine Pionierarbeit mehr leisten, jedoch gilt es, individuelles Know-how hinsichtlich der Rezyklatverarbeitung und Rezepturen aufzubauen. Pauschale Aussagen zu diesen Aspekten sind nicht sinnvoll möglich, da diese stets von den jeweiligen Zielanwendungen und Zielgruppenanforderungen abhängig sind. In der Praxis empfiehlt sich daher ein enger Austausch mit den Zuliefernden. Diese können oft gut einschätzen, welche Anforderungen an die Rezyklate sich aus der entsprechenden Zielanwendung ergeben. Grundvoraussetzung ist hierfür ein gemeinsames Verständnis von Qualität, den kunststoffverarbeitenden Prozessen sowie den Produkthanforderungen, die es zu erfüllen gilt.

Neben Recyclingunternehmen und Herstellenden von Compounds bieten zunehmend auch Herstellende der Neuware (sog. *virgin plastics*) eigene Rezyklate oder Neuware mit Rezyklatanteil an.<sup>39</sup>

### Digitale Plattformen

Einen ersten Überblick über das Rezyklatangebot liefert die Suchmaschine von Industrystock.<sup>40</sup> Hierüber können Rezyklate und Compounds direkt nach Land, Liefertyp und weiteren Rubriken wie Farbmasterbatches oder Funktionsadditive gefiltert werden. Neben direkten Geschäftsbeziehungen zu ausgewählten Rezyklat- und Compoundherstellenden Unternehmen bieten solche Plattformen eine weitere gute Möglichkeit, Kunststoffrezyklate zu beziehen und sich einen ersten Überblick über den Markt zu verschaffen. Der Fokus liegt darauf, Agierende entlang der Wertschöpfungskette zusammenzubringen, Transparenz zu schaffen, Vertrauen aufzubauen und die stetige Weitergabe von Materialdaten zu verbessern. Im Folgenden werden ausgewählte Plattformen am Markt kurz vorgestellt.

---

<sup>38</sup> Vgl. Schmitz, M.; Dengel, G.; Karsubke, H. (2022).

<sup>39</sup> Vgl. Schmitz, M.; Dengel, G.; Karsubke, H. (2022).

<sup>40</sup> Vgl. Industrystock (o. D.).

**(a) Plastship<sup>41</sup>**

**Plastship** war der erste europäische Marktplatz für recycelte Kunststoffe und stellt auch heute noch Anbietenden und Abnehmenden ein Tool bereit, um Sekundärkunststoffe zu handeln.<sup>42</sup> Kunststoffverarbeitende Unternehmen können beispielsweise nach Materialtyp (z. B. Regranulat, Compound, Mahlgut), nach Polymer (PE-HD, PE-HMW, PE-LD), nach Farbkategorie (z. B. transparent, blau), nach Verarbeitungsverfahren (z. B. Spritzguss, Extrusion), Rezyklatdefinition (z. B. MFR), Lieferort, Entfernung und weiteren Kriterien filtern. Über den Additiv-/Masterbatch-Selector kann zudem nach den für den jeweiligen Anwendungsfall passenden Additiven gesucht werden.<sup>43,44</sup> Die Services der Plattform werden kontinuierlich weiterentwickelt. Bis Ende 2023 wird an einer weiteren Funktion gearbeitet, die potenzielle Rezyklatanwendungsbereiche identifiziert, indem bestehende Werkstandards und allgemeine Normen kritisch beleuchtet und neu eingeordnet werden.<sup>45</sup> Damit soll dem immer noch bestehenden Hemmnis entgegengewirkt werden, dass diverse Standards und Normen den Rezyklateinsatz verhindern, obwohl dieser aus produkttechnischer Sicht möglich wäre.<sup>46</sup>

**(b) Cirplus<sup>47</sup>**

**Cirplus** ist eine weitere Plattform, die bei der Beschaffung und dem Verkauf von recycelten Kunststoffen unterstützt. Kunststoffverarbeitende Unternehmen können hier nach passenden Angeboten suchen und dabei die jeweiligen Filtermöglichkeiten nutzen: Materialart (z. B. Rezyklat, Plastikabfall), Angebot (z. B. laufend, einmalig), Quelle (z. B. Post-Industrial,

---

<sup>41</sup> Vgl. Plastship GmbH (o. D.).

<sup>42</sup> Vgl. Plastship GmbH (o. D.).

<sup>43</sup> Vgl. EU-Recycling (2020).

<sup>44</sup> Vgl. Plastship GmbH (o. D.).

<sup>45</sup> Vgl. SKZ (2022/2023).

<sup>46</sup> Vgl. Bendix et al. (2021), S. 168.

<sup>47</sup> Vgl. Cirplus GmbH (o. D.).

Post-Consumer), Materialtyp (z. B. PE-LD, PE-HD, PET), Zustand (z. B. Granulat, Ballen), Farbe (z. B. transparent, blau), DIN SPEC 91446 (z. B. DQL1, DQL2), Zertifikate (z. B. DIN 14001, DIN 9001), Menge und Preis (Min.- und Max.-Werte) sowie Land.

**(c) Second Trade<sup>48</sup>**

**Second Trade** ist eine weitere B2B-Plattform für Sekundärrohstoffe. Verwertende aus ganz Europa können hier Sekundärrohstoffe anbieten. Kaufinteressierte aus allen Ländern können die Angebote einsehen und erwerben. Um eine möglichst hohe Sicherheit für alle Beteiligten zu gewährleisten, haben lediglich geprüfte und verifizierte Partner Zugriff auf die Plattform. Verkäufe finden nach dem Bestbieterprinzip statt, d. h., Rohstoffe werden zu einem Mindestpreis angeboten und dem oder der Höchstbietenden verkauft. Im Gegensatz zu den beiden zuvor genannten Plattformen ist das Kunststoffangebot bei Second Trade hinsichtlich der Materialauswahl begrenzt. Aktuell werden lediglich die Kunststoffe Polystyrol und Polyurethan angeboten.

**(d) Weitere Dienstleistungen und Services digitaler Plattformen**

Neben der Bereitstellung eines Markplatzes für Kunststoffrezyklate bieten einige Online-Plattformen (bspw. Plastship oder Cirplus) weitere Dienstleistungen und Services an, um den kunststoffverarbeitenden Unternehmen den Rezyklateinsatz zu erleichtern. Diese reichen von der Herstellung bis zur Entsorgung der Produkte. Unternehmen werden dabei begleitet, ihre Produkte kreislauffähiger zu gestalten. Nachfolgend sind ausgewählte Dienstleistungen angeführt:

- **Produktanalyse:** Das Produkt wird hinsichtlich der Recyclingfähigkeit analysiert. Dabei liegt der Fokus darauf, Hemmnisse und Chancen für ein werkstoffliches Recycling sowie Optimierungsmöglichkeiten aufzuzeigen.

---

<sup>48</sup> Vgl. Secondtrade GmbH (o. D.).



- **Prozessanalyse:** Auf Basis der am Markt etablierten Aufbereitungsprozesse werden Möglichkeiten zu werkstofflichem Recycling erarbeitet.
- **Verwertungspartnerschaft:** Die Umsetzung des Recyclingprozesses erfolgt im Rahmen von Verwertungspartnerschaften, die aus dem Netzwerk der Plattform (in diesem Fall Plastship) stammen.
- **Umsetzung:** Um ein Recyclingkonzept erfolgreich umzusetzen, gilt es, operative und logistische Herausforderungen zu bewältigen. Die plattformbetreibenden Unternehmen übernehmen auf Wunsch die Steuerung und den Aufbau aller nötigen Ressourcen.

## 2.2 Stand der Technik und Innovationen im Recyclingprozess von Kunststoffabfällen aus Leichtverpackungen

### 2.2.1 Erfassung und Sortierung der Abfallströme

#### LVP-Erfassung

In Deutschland werden lizenzierte Kunststoff-LVP durch Sammlung in Gelben Säcken und Gelben Tonnen erfasst. Hierbei werden meist auch andere sogenannte stoffgleiche Nichtverpackungen (= Wertstoffe (WST)) miterfasst. Die Erfassung erfolgt durch Unternehmen im Auftrag der dualen Systeme, die die gesammelten LVP in die Sortieranlagen bringen.

#### LVP-Sortierung

Um die ausgedienten Leichtverpackungen aus Haushalten, die im dualen System getrennt erfasst werden, möglichst sortenrein zu trennen, ist eine Vielzahl an Verfahrensschritten nötig. Die konventionelle LVP-Sortierung hat sich seit Einführung des dualen Systems sukzessive weiterentwickelt. Aus den zunächst überwiegend durch Handsortierung geprägten Kleinanlagen entwickelten sich die heute weitestgehend mechanisierten und automatisierten Großanlagen mit einer Gesamtdurchsatzmenge von über 120.000 t/a (entspricht ca. 4 Mio. angeschlossenen Einwohnenden).

Darüber hinaus ist eine weitgehende Standardisierung sowohl der genutzten Grundverfahren als auch der Prozessabfolge zu verzeichnen.<sup>49</sup>

Heute werden im Wesentlichen zwei Gruppen unterschieden: zum einen LVP-Sortieranlagen mit Kunststoffartensortierung (KA-Sortierung), in der die sogenannten formstabilen Kunststoffverpackungen (Schalen, Flaschen, Becher, Dosen etc.) nach Polymerart separiert werden, zum anderen ältere Anlagen ohne KA-Sortierung, die sich im Wesentlichen durch kleinere Durchsätze unterhalb von 40.000 t/a auszeichnen.

Die Funktion der LVP-Sortierung innerhalb der jeweiligen Prozesskaskaden lässt sich wie folgt charakterisieren: Verpackungen werden für eine nachfolgende materialspezifische Aufbereitung bestimmten Gruppen zugeordnet. In der LVP-Sortierung findet also weder ein Aufschluss einzelner Komponenten einer Verpackung statt noch ist die Sortierung im verfahrenstechnischen Sinne abgeschlossen. Vielmehr werden aus technischer Sicht Vorkonzentrate erzeugt. In der Praxis der LVP-Sortierung ist die intendierte zielgerichtete Zuweisung einer Verpackung also maßgeblich von der finalen Gestaltung der Gesamtverpackung abhängig. Sie verlässt die Prozessstufe bezüglich ihrer Komposition im Wesentlichen so, wie die Konsumierenden sie in die getrennte Erfassung gegeben haben.

Anhand eines generellen Fließschemas können die eingesetzten Sortierverfahren verallgemeinert dargestellt werden. Die Anordnung einzelner Prozessschritte sowie die entsprechenden Sortiertechnologien variieren dabei von Anlage zu Anlage (vgl. Abbildung 1), wobei die wesentlichen Komponenten einer LVP-Sortieranlage – gemäß Stand der Technik – wie folgt zu nennen sind:

**(a) Konditionierung** des Inputmaterials mithilfe von Gebindeöffner und Dosiermaschine,

---

<sup>49</sup> Vgl. Umweltbundesamt (2021).

- (b) **Klassierung** in drei bis fünf Korngrößen anhand von Trommel- und Schwingsieben,
- (c) **Sortierung** in unterschiedliche Material- und Kunststofffraktionen mittels Magnetabscheider, Wirbelstromscheider, Windsichter, sensorgestützter NIR-Sortiersysteme, Ballistikseparatoren und manueller Klaubung.<sup>50</sup>

Zusätzlich wird in Abbildung 1 der Weg von PP-basierten „formstabilen“ Verpackungen zur PP-Fraktion (mit roten Pfeilen markiert) vorbereitend auf Kapitel 3 dargestellt. Weiterhin sind die obligatorisch einer werkstofflichen Verwertung zuzuweisenden Sortierfraktionen grün hinterlegt, eine orange Hinterlegung signalisiert eine überwiegend energetische Verwertung und eine rote Hinterlegung eine obligatorische energetische Verwertung.

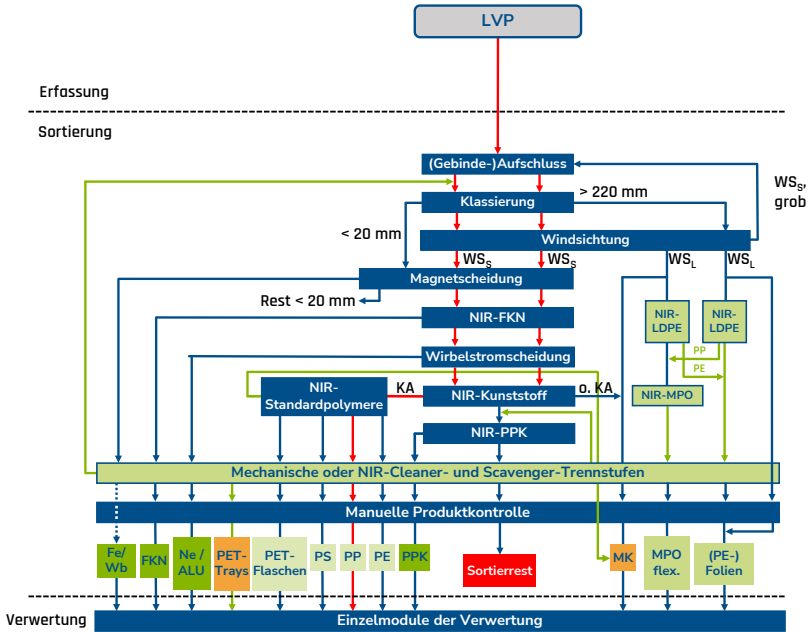
Den ersten Schritt bildet der Gebindeaufschluss (Konditionierung), bei dem sowohl größere Sammelsäcke als auch kleinere Müllbeutel aufgeschlossen werden müssen. Das entstandene Gemisch durchläuft im nächsten Schritt eine Siebklassierung (Klassierung). Dazu werden überwiegend Trommelsiebe verwendet, die mehrere Funktionen erfüllen:

- Entleeren der aufgerissenen Säcke,
- Homogenisierung des Volumenstroms und
- Verteilung auf ggf. mehrere Linien (symbolisiert durch die parallelen Pfeile in Abbildung 1).

Durch die Klassierung erfolgt eine Einengung der Größenspanne, um Voraussetzungen für eine effiziente Sortierung und Voranreicherung von Verpackungsgruppen zu verbessern.

---

<sup>50</sup> Vgl. Knappe et al. (2021), S. 52.



**Legende**

**Sortierfraktionen**

ALU – Aluminiumfraktion; FE – Eisen-Metalle; FKN – Flüssigkeitskartons; LDPE – Low Density Polyethylen; LVP – Leichtverpackungen; MK – Mischkunststoffe; MPO – Mixed Polyolefin, NE – Nicht-Eisen-Metalle; NIR – Nahinfrarot; PE – Polyethylen; PET – Polyethylenterephthalat; PS – Polystyrol, PP – Polypropylen; PPK – Papier-Pappe-Karton; Wb – Weißblech

**Sonstige**

flex. – flexibel; KA – Kunststoffarten (HDPE, PP, PS, PET-A); o. KA – ohne Kunststoffartensortierung, WSL – Windsichter, Leichtgut; WSs – Windsichter, Schwergut

**Abbildung 1: Schematische Darstellung der LVP-Sortierung © Institut Cyclos-HTP GmbH**

Einheitlich wird in den Anlagen ein funktionaler Trennschnitt von 220 mm ausgeführt, der in älteren Anlagen für die separierten Kunststofffolien (entspricht in etwa dem Format DIN A3) die Grenzziehung zwischen Folienfraktion mit Zuweisung zur Regranulierung und Mischkunststofffraktion zur überwiegend energetischen Verwertung vorab definiert. Als Sortierstufe ist die Klassierung auch bezüglich des unteren Trennschnitts anzusehen, da das abgeseibte Feinmaterial ggf. nach Metallabtrennung als

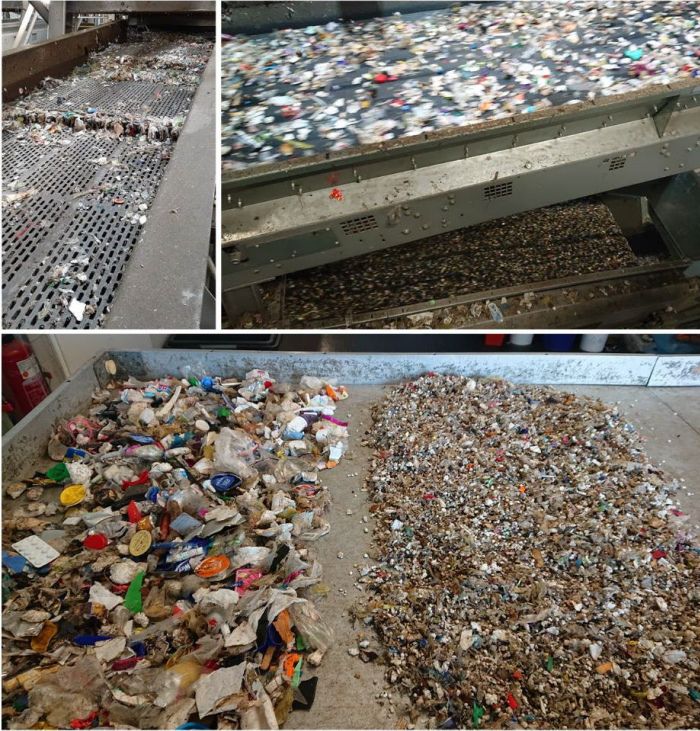
Sortierrest abgeführt wird. Relevant ist dieser Schritt für die Einstufung kleinerer Portionsverpackungen (wie z. B. Kaffeesahnebecher), die in modernen Anlagen meist im Zuge der Feinabsiebung mittels Langlochmasche (ca. 20 mm x 40 mm) für die nachfolgenden Sortieroperationen erhalten bleiben. In älteren Anlagen wird noch teilweise bei 50 bis 60 mm abgesiebt; nichtmetallische Kleinverpackungen sind dann faktisch nicht sortierfähig.

Die Feinklassierung beim sog. 20-mm-Siebschnitt wird prozesstechnisch stets zweistufig über eine Kombination von Trommelsieb und Schwingsieb umgesetzt.<sup>51</sup> Dem Schwingsieb wird der Siebdurchgang der vorge-schalteten Trommelsiebmaschine zugeführt, die mit einer Maschinenweite von 50 mm ausgerüstet ist. Die Schwingsiebmaschine ist so ausgeführt, dass in ihrem Siebdurchgang ein näherungsweise verpackungsfreier Materialstrom als Sortierrest abgeführt wird. Der Siebüberlauf des Schwingsiebes (20 bis 50 mm) wird an geeigneter Stelle wieder mit dem Siebüberlauf der Trommelsiebmaschine zusammengebracht (vgl. Abbildung 2).

Die Abbildung zeigt oben links das Siebdeck der Schwingsiebmaschine mit dem beschriebenen Langlochbelag. Rechts daneben sind die beiden abführenden Förderbänder mit den Materialströmen 20 – 50 mm (oberes Band) und Feinkorn < 20 mm (darunter zu erkennen) zu sehen. Typische Bestandteile der Fraktion 20 – 50 mm sind Objekte wie Kaffeekapseln Drehverschlüsse, Lippenstifthülsen, Kronkorken etc. aus unterschiedlichen Materialien. Demgegenüber wird die Feinstfraktion < 20 mm optisch von dem EPS-Abrieb dominiert.

---

<sup>51</sup> Das Verfahren wurde 1997 von der Ingenieurgesellschaft HTP entwickelt.



**Abbildung 2:** Veranschaulichung von Ergebnissen der Feinabsiebung bei der LVP-Sortierung © Institut Cyclos-HTP GmbH

Im Anschluss erfolgt eine weitere mechanisch-verfahrenstechnische Sortierung der Materialien entsprechend ihren unterschiedlichen physikalischen Eigenschaften (Sortierung). Nach Windsichtung zur Separierung von Kunststofffolien findet zunächst die Magnetscheidung statt. Trennmerkmal ist hier die magnetische Suszeptibilität (auch Magnetisierbarkeit) des Materials. Mit hohem Wirkungsgrad abgetrennt werden alle Verpackungen, die ferromagnetische Eigenschaften aufweisen. Das sind neben Weißblechdosen und Kronkorken auch Verpackungen, in denen Stahl als Nebenkomponente verbaut ist, beispielsweise in Kombidosen mit Weißblechboden.

Im nächsten Schritt werden Flüssigkeitskartons aussortiert. Hierfür kommen ausschließlich sensorgestützte Sortierautomaten zur Anwendung, die auf dem Prinzip einer Nahinfrarot-Reflexionsmessung (im Folgenden „NIR-Trenner“ genannt) basieren.

Die Aussortierung von Aluminiumverpackungen erfolgt nachgeschaltet mithilfe von Wirbelstromscheidung. Trennmerkmal ist hier die elektrische Leitfähigkeit. Da die Auslenkung der leitfähigen Materialien in der maschinentechnischen Umsetzung im Abwurf eines schnelllaufenden Förderbandes stattfindet, kommt es zur Überlagerung mit den ballistischen Einflussgrößen. Mit hohem Wirkungsgrad lassen sich Aluminiumverpackungen und Aluminiumverbunde über Wirbelstromscheider aussortieren. Auch die meisten Verbundverpackungen, die Aluminiumfolien als Barrierelayer enthalten (z. B. Suppentüten, Drückverpackungen, Tuben etc.), werden bei der Sortierung mittels Wirbelstromscheider in die Aluminiumfraktion überführt.

Auf die Wirbelstromscheidung folgt die Aussortierung der formstabilen (dreidimensionalen) Kunststoffverpackungen – entweder als Mischkunststoffe, als MPO-Teilstrom oder als kollektive Trennstufe für die weitere KA-Sortierung. Bei allen Unterschieden bezüglich des Differenzierungsumfangs nach Polymerart kommen für die erste Heraustrennung von Kunststoffen aus dem Gemisch ausschließlich NIR-Trenner zum Einsatz. Dies gilt für alle 3D-Kunststoffsor-tierprodukte, mit Ausnahme der Fraktionen 322 (Eimer und Kanister > 5 l), 325 (PET-Flaschen) und 321 (PO-Flaschen)<sup>52</sup>, die in wenig relevanten Einzelfällen manuell separiert werden. Die PP-Fraktion wird meist als erste Kunststoffsor-tierfraktion

innerhalb der sogenannten Polymerkaskade abgetrennt, mechanisch nachgereinigt und nach der Kontrollsortierung verpresst.

---

<sup>52</sup> Vgl. **Duales System Deutschland GmbH (2017)**.

Zuletzt werden Papierverpackungen und Papierverbunde aussortiert. Auch hierfür werden überwiegend NIR-Trenner eingesetzt. Bei kleineren Anlagen älterer Generation ist diese Trennstufe teilweise nicht automatisiert.

Der Umgang mit den hauptsächlich aus Kunststofffolien bestehenden Leichtgütern der Windsichtung einzelner Siebfraktionen wurde im Rahmen der Sortierverträge bis Ende 2018 relativ einheitlich geregelt. Aus den oberen Trennschnitten (Schnitte > 220 mm) wurde nach manueller Nachsortierung die Folienfraktion 310 erzeugt. Die übrigen Größenklassen wurden den Mischkunststoffen – bei Anlagen mit MPO-Erzeugung den formstabilen polyolefinischen Kunststoffverpackungen der Fraktion 323 – zugewiesen. Als Folge der Erhöhung der Recyclingquoten durch das VerpackG (§ 16) wurden erste Sortierkonzepte dahingehend modifiziert, auch im Bereich der flexiblen Verpackungen in höherem Maße Monofraktionen zu generieren, die besser auf die Anforderung einer hochwertigen werkstofflichen Verwertung zugeschnitten sind.

Da die traditionelle Formel „Folie > DIN A4  $\cong$  LDPE-Folie“ ohnehin nur noch bedingt gilt und die qualifizierte Sortierung kleinerer Formate eine Implementierung von NIR-Trennern zur Aussortierung von PE erforderlich macht, wurden die Folienlinien in den Anlagen der neuesten Generation ebenfalls mit NIR-Trennern ausgestattet. Auch in einigen älteren Großanlagen wurden entsprechende Umbauten vorgenommen. Dadurch können in mehreren Anlagen bereits LDPE-Folien und (PP-angereichertes) MPO-flex (323-2) anstatt (großformatiger) Folien und Mischkunststoffen produziert werden.

### **Output-Fraktionen der LVP-Sortierung**

Nach gegenwärtigem Stand der Technik ist mit der Prozessabfolge funktionaler Verfahrenskomponenten eine Überführung der Wertstoffe in mehr als zehn Wertstofffraktionen möglich. Der Output-Anteil der PP-Fraktion am Ende der Sortieranlage entspricht ca. 6 % der LVP-Inputmenge und ca. 12 % der Produktionsmengen an



Kunststofffraktionen. Die Ausbeute – d. h. die Produktfraktion bezogen auf den Polymeranteil im Input – ist für die unterschiedlichen Fraktionen in Tabelle 2 dargestellt.

**Tabelle 2: Sortierausbeute bezogen auf den Polymeranteil im Input<sup>53</sup>**

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

Die geforderte Reinheit der einzelnen Sortierfraktionen wird durch die Produktspezifikation der dualen Systeme definiert. Gemäß Spezifikation der dualen Systeme sind bei den PE-, PP- und PS-Fraktionen Reinheiten von jeweils 94 Ma.-% zu erzielen. Diese Vorgaben werden in der gegenwärtigen stofflichen LVP-Sortierung für die einzelnen Fraktionen meist jedoch nicht erreicht. Ausschließlich die PE-Fraktion erfüllt in der Praxis diese Vorgabe. PP und PS liegen mit 86 Ma.-% sowie 78 Ma.-% darunter.<sup>54</sup> Ähnlich verhält es sich bei den PET- und Folien-Fraktionen, die laut Spezifikation Reinheiten von 98 Ma.-% und 92 Ma.-% aufweisen sollten, aber lediglich 75 Ma.-% und 88 Ma.-% erreichen.<sup>55</sup>

Probleme und Herausforderungen sind weniger bei der Sortierung als bei der eigentlichen Erfassung der Abfälle in den Haushalten zu identifizieren. Durch das Mülltrennverhalten der Bürgerinnen und Bürger gehen 25 bis 30 % der recycelbaren Kunststoffverpackungen verloren, da diese

<sup>53</sup> Vgl. Knappe et al. (2021), S. 53.

<sup>54</sup> Vgl. Bulach, W. et al. (2022), S. 30.

<sup>55</sup> Vgl. Knappe et al. (2021), S. 53.

teilweise über die Restmülltonne entsorgt werden. Beim eigentlichen Sortierprozess treten unterdessen Verluste von maximal 5 % auf.

### 2.2.2 Aufbereiten und Regranulieren der Wertstofffraktionen

Die separierten Wertstofffraktionen aus der Sortierung (vgl. Kapitel 2.2.1) werden anschließend weiteren Aufbereitungsschritten unterzogen, um daraus hochwertige Rezyklate mit definierten Eigenschaften herzustellen. Für die werkstoffliche Verwertung von Kunststoffabfällen hat sich das trocken-/nassmechanische Verfahren in der Praxis etabliert. Der Fokus liegt auf der Abtrennung von Störstoffen wie Papier, Glas oder Fremdkunststoffen sowie auf der Entfernung von Schmutz und Verunreinigungen. Abbildung 3 zeigt den Ablauf des trocken-/nassmechanischen Verfahrens.

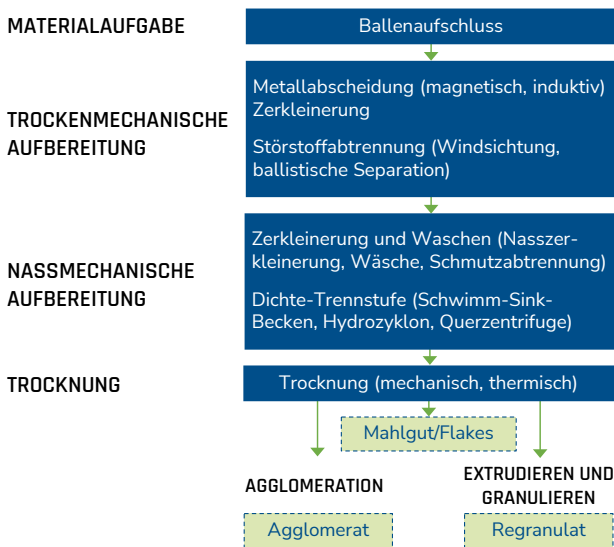


Abbildung 3: Schematische Darstellung des trocken-/nassmechanischen Verfahrens zur Kunststoffaufbereitung nach dem Stand der Technik<sup>56</sup>

<sup>56</sup> Eigene Darstellung aus VDI Zentrum Ressourceneffizienz (2023), S. 27.

Die folgende vereinfachte Prozessbeschreibung berücksichtigt alle entscheidenden Prozessschritte des eigentlichen Verwertungsprozesses. In der hier betrachteten Abstraktionsebene lassen sich die unterschiedlichen Anlagenkonfigurationen in einem einzigen Grundverfahren mit einer Untervariante abbilden.

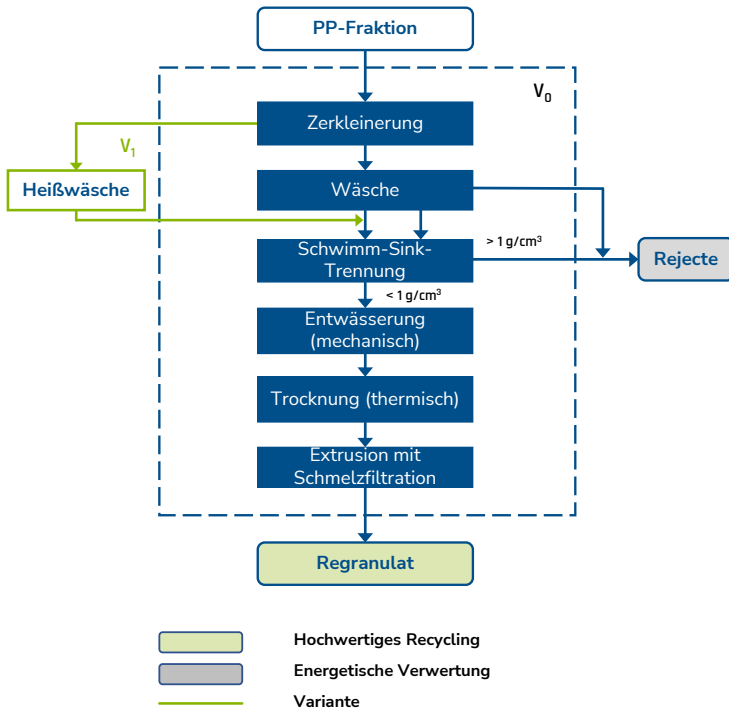


Abbildung 4: Vereinfachtes Verfahrensfliessbild der PP-Verwertung © Institut Cyclo-STEP GmbH

Abbildung 4 zeigt das Grundverfahren des nachfolgend beschriebenen Aufbereitungsprozesses (V<sub>0</sub>) unter Ausweisung der Variante mit Heißwäsche (V<sub>1</sub>). Die von den Sortieranlagen bereitgestellten Qualitäten der PP-Sortierfraktion werden standardmäßig als Großballen angeliefert und zwischengelagert. Die eigentliche Verarbeitung beginnt mit der Vorzerkleinerung der Großballen mit nachgeschalteter Magnetscheidung zur

Abtrennung des Bindedrahtes. Im Standardverfahrensablauf erfolgt anschließend die Feinzerkleinerung mittels Schneidmühlen.

Vor- und Feinzerkleinerung sind in Abbildung 4 als Zerkleinerung zusammengefasst. Ziel der Zerkleinerung ist die Erzeugung von Mahlgut mit einer Größe von ca.  $< 10$  mm als Voraussetzung für die Funktionsfähigkeit der nachfolgenden Trenn- und Transportprozesse. Der sich anschließende Waschprozess ist in der Regel nicht als Heißwäsche ausgeführt und erfolgt ohne Zugabe von Tensiden oder sonstigen Detergenzien. Die Abtrennung nichtpolyolefinischer Kunststoffpartikel findet mittels Schwimm-Sink-Sortierung (gravimetrischer Sortierung in Wasser) bei einer Trenndichte von  $1 \text{ g/cm}^3$  statt. Das Verfahrensprinzip der Dichtentrennung kann in unterschiedlichen Maschinentypen bzw. Sortieraggregaten umgesetzt werden (Schwimm-Sink-Becken, Sortierzentrifugen, Hydrozyklone etc.) Nichtpolyolefinische Kunststoffpartikel gelangen in das Sinkgut und werden als „Reject“ ausgeschleust. Das im Schwimmgut angereicherte Polyolefingemisch wird entwässert, ggf. getrocknet und abschließend mittels Extruder umgeschmolzen. Hierbei werden je nach Kundenwunsch Zuschlagsstoffe wie Masterbatch und Kreide hinzugefügt. Nach der Extrusion mit Schmelzefiltration und ggf. Homogenisierung des erzeugten Regranulates erfolgt die Bereitstellung der Verkaufseinheiten in Big Bags, Oktabins oder Silos.

Erzeugt wird ein in der Basisvariante mittel- bis dunkelgraues Regranulat (vgl. Abbildung 5; bei Zuschlag von Pigmenten auch weitere dunkle Farben), das z. B. zur Produktion von Kunststoffrohren und für diverse Spritzgussanwendungen vermarktet wird. Die Verbesserung der Qualität von PP-Rezyklaten zur Erweiterung des Anwendungsspektrums erfordert zusätzliche Schritte. Hier sind zum einen die der Zerkleinerung vorgeschaltete Farbsortierung und die Mahlgut-Farbsortierung zu erwähnen, die es für einen Teilstrom ermöglichen, auch für hellere, farbsensiblere Anwendungen eingesetzt zu werden. Zum anderen ist die Heißwäsche zur Verbesserung der Oberflächenreinigung (insbesondere zur Entfernung von Etikettenklebstoffen) anzuführen.

Hierbei handelt es sich um eine Voraussetzung für Dekontaminationsverfahren mittels Vakuumextraktion, mit denen rPP z. B. für Kosmetikverpackungen erzeugt werden kann. Dekontamination über Vakuumextraktion ist in der Praxis nur nach vorgeschalteter Heißwäsche umsetzbar. Bislang verfügen in Deutschland zwei PP-Recyclingunternehmen über integrierte Heißwäschen.



Abbildung 5: rPP-Regranulat (links: dunkelgraue Basisvariante, rechts: schwarz pigmentiert) © Öko-Institut/Andreas R. Köhler

Daneben gibt es lösemittelbasierte Trennverfahren wie beispielsweise das Vinyloop-, das CreaSolv- oder das Newcycling-Verfahren. Aus ökonomischen Gründen haben sich diese Trennverfahren in Deutschland allerdings bisher nicht im großtechnischen Maßstab etabliert.<sup>57</sup>

### 2.2.3 Informationsmöglichkeiten zum Rezyklateinsatz für kunststoffverarbeitende Unternehmen

Für Unternehmen, die Rezyklate verarbeiten möchten, ist ein umfassendes Know-how hinsichtlich geeigneter Qualitäten, der Mischung von Rezepturen und Verarbeitungstechnik essenziell. Grundlagenforschung auf dem Gebiet ist jedoch nicht mehr notwendig. Unternehmen können beispielsweise über Trainingszentren und Schulungen Wissen aufbauen oder mit Anlagenherstellenden sowie Herstellende von Compounds oder anderen

<sup>57</sup> Vgl. Knappe et al. (2021), S. 72.

Dienstleistungsunternehmen zusammenarbeiten. Neben dem entsprechenden Wissen ist vor allem die Entwicklung eines positiven Mindsets gegenüber dem Rezyklateinsatz bei den Beteiligten entlang der Wertschöpfungskette notwendig.

### **Trainingszentren und Schulungen**

Ein umfassendes Know-how ist bei der Beschaffung und dem Einsatz von Rezyklaten grundlegend. Das Angebot an entsprechenden Trainings und Schulungen nimmt stetig zu, befindet sich aber gegenwärtig noch auf eher niedrigem Niveau. Einige Forschungs- und Bildungsinstitute bieten Kurse zum Thema Rezyklateinsatz und -verarbeitung an, wie beispielsweise das Kunststoff Zentrum (KUZ) in Leipzig, das Kunststoff Institut Lüdenscheid (KIMW) oder das Süddeutsche Kunststoff-Zentrum (SKZ) in Würzburg.

Darüber hinaus bieten auch vereinzelt andere Einrichtungen Schulungsmöglichkeiten an. Zu nennen sind hier beispielsweise der Bundesverband der Deutschen Entsorgungs-, Wasser- und Kreislaufwirtschaft e.V. (BDE), das Bildungszentrum für die Ver- und Entsorgungswirtschaft (BEW), der Verein Deutscher Ingenieure (VDI) oder die Fresenius Akademie.

### **Anlagenherstellende und Herstellende von Recompounds**

Immer mehr Anlagenherstellende für Spritzgussmaschinen sind mittlerweile bzgl. der Verarbeitung von Rezyklaten (z. B. Spritzgießen von Sandwich-Bauteilen) bestens aufgestellt. Zudem bieten diese Unternehmen teilweise umfassende Beratungs- und Trainingsleistungen an. Auch das Thema Digitalisierung nimmt im Zuge der Circular Economy eine Schlüsselposition ein. Engel Austria hat beispielsweise im Programm „injection 4.0“ eine digitale Lösung entwickelt, die auf Chargenschwankungen spezialisiert ist. Alle Details sind den jeweiligen Firmen-Websites zu entnehmen.<sup>58</sup>

---

<sup>58</sup> Vgl. Engel Austria (o. D.). Darüber hinaus sei an dieser Stelle auch das Unternehmen Krauss Maffei als weiteres Beispiel angeführt.

Neben den anlagenherstellenden Unternehmen sind Herstellende, von denen Rezyklate und Recompounds bezogen werden, geeignete Ansprechpersonen, wenn es darum geht, Fragen zu passenden Qualitäten, der Mischung von Rezepturen und der Verarbeitungstechnik zu klären. In der Praxis bestehen häufig ein sehr enger Kontakt und intensiver Austausch zwischen zuliefernden und kunststoffverarbeitenden Unternehmen. Dieses Zusammenspiel ist deshalb wichtig, um die Qualitäten an die jeweiligen Spezifikationen der Produkte anzupassen und bedarfsgerechte Lösungen zu entwickeln.<sup>59</sup>

### 2.3 Darstellung der technischen Parameter für die Herstellung neuer Verpackungen aus rezyklierten Kunststoffen

Bei der Verarbeitung von Rezyklaten im Spritzgießverfahren ist die Viskosität, dargestellt als Schmelze-Volumenfließrate (*Melt Flow Rate*, MFR), ein entscheidender Parameter. Die Viskosität muss niedrig sein (hoher MFR-Wert), damit das Material für die Verarbeitung in einem modernen Spritzgießverfahren die richtige Fließfähigkeit aufweist. In modernen Spritzgießwerkzeugen ist ein MFR-Wert von mehr als 45 g/10 min erforderlich, um Verarbeitungsverfahren mit sehr kurzen Zykluszeiten für die Herstellung sehr dünnwandiger Produkte nutzen zu können.<sup>60</sup> Verunreinigungen und Füllstoffe im Rezyklat können zu einem Anstieg der Viskosität – und damit zu einer Absenkung der MFR – führen, was sich ungünstig auf die Verarbeitbarkeit der Rezyklate im Spritzguss auswirkt. Rezyklate mit niedrigem MFR sind daher für die Herstellung dünnwandiger Produkte nicht geeignet. Um diese verarbeiten zu können, muss eine Mischung (Blend) hergestellt werden.<sup>61</sup> Die Bestimmung des MFR erfolgt für Thermoplaste meist nach DIN EN ISO 1133, in seltenen Fällen wird noch die bereits zurückgezogene DIN 53735 angewandt.<sup>62</sup>

---

<sup>59</sup> Vgl. Schmitz, M.; Dengel, G.; Karsubke, H. (2022).

<sup>60</sup> Vgl. Maschinenbau-Wissen (2009).

<sup>61</sup> Vgl. Schmitz, M.; Dengel, G.; Karsubke, H. (2022).

<sup>62</sup> Vgl. Endres, H.-J. und Shamsuyeva, M. (2020).

Als weitere wichtige Parameter sind per se alle mechanischen Größen wie beispielsweise Bruch- und Zugdehnung oder Kerbschlagzähigkeit zu nennen. Für hohe Rezyklatqualitäten gilt es, die Rezeptur je nach Inputmaterial anzupassen. Mit LVP-Abfällen aus Quellen mit sortenreiner gewerblicher Sammlung (z. B. Gastronomie) sind Mischungen mit bis zu 100 % Rezyklatanteil möglich. Demgegenüber können Post-Consumer-Rezyklate (PCR) aus der haushaltsnahen Sammlung in dualen Systemen in der Regel nur dann zu hochwertigen Anwendungen wie beispielsweise Farbeimern verarbeitet werden, wenn ein gradueller Anteil Kunststoffneeware hinzugemischt wird. In der Praxis enthalten sogenannte RAL-Mischungen (mit Gütezeichen „RAL-GZ 720, % Recycling Kunststoff“ – vgl. Kap. 2.1.1) zwischen 30 und 90 % PCR-Rezyklatanteil.<sup>63</sup> Bei hochwertigen Anwendungen wie Farbeimern kann ein hoher Rezyklatanteil von über 90 % auch durch die Einrichtung eines geschlossenen Recyclingkreislaufs, z. B. in Form eines individuellen Rücknahmesystems, erreicht werden. Bei PCR aus gemischten LVP-Abfällen ist ebenso ein 100%iger Rezyklatgehalt möglich, doch wird hierfür eine komplexere Sortierung im Recyclingprozess erforderlich, wodurch der Rezyklatpreis steigt.

Gerüche von Rezyklaten waren und sind nach wie vor ein Störfaktor, der die Marktakzeptanz der daraus hergestellten Produkte beeinträchtigen kann. Dies betrifft insbesondere PCR, die ohne zusätzliche Reinigungsschritte aus gemischten LVP-Abfällen erzeugt werden. Die Gerüche stammen primär aus der Migration ehemaliger Füllgüter (z. B. Fleisch- oder Milchprodukte), Farben oder Klebstoffe in die Kunststoffe. Inzwischen haben einige Anbieter von PCR ihre Recyclingprozesse so weit optimiert, dass die Rezyklate kaum noch durch unangenehme Gerüche auffallen<sup>64</sup>.

---

<sup>63</sup> Vgl. Schmitz, M.; Dengel, G.; Karsubke, H. (2022).

<sup>64</sup> Vgl. Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie und Mobilität Rheinland-Pfalz (2022).



Meist verfliegen diese bereits wenige Minuten nach dem Auspacken des Produkts.

Ein weiterer möglicher Störfaktor beim Spritzgießen von PCR ist das Verdampfen flüchtiger Bestandteile, die durch die chemische Umwandlung der Polymere beim Erhitzen entstehen. Um diese auf ein Minimum zu reduzieren, ist neben einer kontinuierlichen Qualitätskontrolle der PCR-Materialien auch der Einsatz einer Prozessluftreinigung angebracht. Das gilt allerdings ebenso bei der Verarbeitung von Neuware. Gefährdende Substanzen (SVHC) dürfen in Verpackungsanwendungen nicht enthalten sein.

In PCR aus rezyklierten LVP-Abfällen sind üblicherweise keine REACH-relevanten Additive enthalten, bei anderen Wertstoffquellen wie z. B. Rezyklaten aus Elektroaltgeräten kann das aber durchaus der Fall sein. In den letzten Jahren ist die Gefahr solcher Verunreinigungen in Rezyklaten jedoch stetig geringer geworden.<sup>65</sup>

## **2.4 Politische und regulatorische Rahmenbedingungen für den Einsatz von Kunststoffrezyklaten heute und in Zukunft**

Die Kreislaufführung von Kunststoffen rückt auf europäischer Ebene zunehmend in den Fokus politischer und regulatorischer Maßnahmen. Nicht zuletzt vor dem Hintergrund der Klimaziele wird angestrebt, den Einsatz fossiler Primärrohstoffe u. a. in der Kunststoffproduktion zu reduzieren. Auch die umweltgerechte Entsorgung von Plastikabfällen, insbesondere gebrauchten Leichtverpackungen aus Kunststoff, stellt aufgrund der umfangreich anfallenden Mengen ein großes Problem dar. Nicht ordnungsgemäß entsorgte Kunststoff-LVP können in die Umwelt gelangen und sich dort anreichern, da sie sich kaum zersetzen. Langfristig tragen

---

<sup>65</sup> Vgl. Schmitz, M.; Dengel, G.; Karsubke, H. (2022).

Verpackungsabfälle daher enorm zur Verschmutzung der Umwelt mit Mikroplastik bei.

Vor diesem Hintergrund ist die stoffliche (Wieder-)Verwertung von LVP-Kunststoffabfällen weit oben in der Abfallhierarchie angesiedelt, da sie es unterstützt, die vorgenannten Probleme zu vermeiden. Aus diesem Grund wurden u. a. die Recyclingziele im Verpackungsgesetz angehoben. Nichtsdestotrotz sind die Mechanismen des freien Marktes allein bislang nicht ausreichend (vgl. Kapitel 2.1), um angemessene Anreize für die weitgehende Wiederverwertung von vermischten LVP-Kunststoffen zu setzen. Infolgedessen bleiben die Recyclingquoten für PCR-Kunststoffabfälle in der Praxis hinter den regulatorischen Zielvorgaben zurück. Auch deshalb finden sich auf EU-Ebene derzeit unterschiedliche regulatorische Initiativen. Daneben existieren freiwillige Initiativen der Kunststoffbranche, um die Rezyklatnutzung aus PCR-Kunststoffabfällen zu steigern. Die wichtigsten Policy-Initiativen sind in den folgenden Abschnitten kurz skizziert.

#### **2.4.1 EU-Kunststoffstrategie und Einwegkunststoffrichtlinie**

Die EU-Kunststoffstrategie ist am 3. Juli 2019 als Richtlinie 2019/904/EU über die Verringerung der Auswirkungen bestimmter Kunststoffprodukte auf die Umwelt (Einwegkunststoffrichtlinie) in Kraft getreten. Mit ihrer Hilfe soll die Grundlage für eine neue Kunststoffwirtschaft geschaffen werden. Konkret werden darin folgende Themen adressiert:

- Wiederverwendung, Reparatur und Recycling,
- Förderung der Entwicklung nachhaltigerer Materialien,
- Förderungen des Marktes für recycelte Kunststoffe.

Die Strategie sieht u. a. vor, dass bis zum Jahr 2030 alle in der EU auf den Markt gebrachten Kunststoffe wiederverwendbar sind oder ökonomisch sinnvoll recycelt werden können. Außerdem soll der Rezyklatanteil in der Kunststoffverarbeitung substanziell erhöht werden. Neben dem Ausschluss nicht recycelbarer Materialien aus Kunststoffverpackungen

besteht daher eine große Notwendigkeit, die Sortierung, Aufbereitung und Verarbeitung von Kunststoffabfällen zu steigern.<sup>66,67</sup>

### 2.4.2 EU-Verpackungsrichtlinie (EU-VerpackRL)

Die Verpackungsrichtlinie (EU-VerpackRL) ist am 4. Juli 2018 im Zuge des EU-Abfallpaketes in Kraft getreten. Sie beruht auf der 1994 eingeführten EU-Verpackungsrichtlinie 94/62/EG, im Rahmen derer die EU-Mitgliedsstaaten Maßnahmen zur Reduktion von Verpackungsabfällen und deren Umweltauswirkungen festgelegt haben. Mit der Erneuerung der Richtlinie soll der Übergang zu einer Kreislaufwirtschaft gefördert werden. Die Neuerungen beziehen sich dabei auf folgende Bereiche:

- Abfallvermeidung,
- Recycling und Wiederverwendung,
- Abfallverwertung und -beseitigung.

Konkret sieht die aktualisierte EU-Verpackungsrichtlinie vor, dass die EU-Mitgliedsstaaten die Recyclingziele von Verpackungsabfällen heraufsetzen, den Anteil von wiederverwendbaren Verpackungen und deren tatsächliche Wiederverwendung steigern und Anreize für die Anwendung der Abfallhierarchie schaffen. Für Verpackungsabfälle aus Kunststoff wird ein Recyclingziel von 50 Ma.-% bis 2025 und 55 Ma.-% bis 2030 gesetzt. Auch an die Gestaltung von Verpackungen werden Anforderungen gestellt. Diese sollen so konzipiert sein, dass sie umweltgerecht wiederverwendet werden können, ohne dabei die Lebensmittelsicherheit oder die Gesundheit der Verbraucher und Verbraucherinnen zu beeinträchtigen.<sup>68,69</sup>

---

<sup>66</sup> Vgl. BMK (o. D.).

<sup>67</sup> Vgl. Umweltbundesamt (2018).

<sup>68</sup> Vgl. DR Deutsche Recycling Service GmbH (o. D.).

<sup>69</sup> Vgl. EU-VerpackRL (2018).

### 2.4.3 EU-Aktionsplan Kreislaufwirtschaft

Der Aktionsplan Kreislaufwirtschaft wurde am 11. März 2020 als ein wichtiges Element des europäischen Green Deals, der europäischen Agenda für Klimaneutralität und nachhaltiges Wachstum, verabschiedet. Er bildet einen (Rechts-)Rahmen für nachhaltige Produktpolitik und zielt darauf ab, die europäischen Produktions- und Verbrauchsprozesse klimaneutral und wettbewerbsfähig zu gestalten. Er beinhaltet drei wesentliche Komponenten:

- Maßnahmen zur Produktgestaltung,
- Maßnahmen zur Stärkung der Position der Verbrauchenden,
- Maßnahmen für nachhaltigere Produktionsprozesse.

Kunststoffe sind eine der sieben Produktwertschöpfungsketten im Fokus des Aktionsplans. Übergeordnetes Ziel ist, die stoffliche Verwertung von recycelten Kunststoffen zu erhöhen. Wichtige Handlungsfelder beinhalten hier zum einen die Einführung einer verbindlichen Rezyklateinsatzquote in den Bereichen Verpackungen, Baustoffe und Fahrzeuge, zum anderen die Bepreisung für jedes nicht recycelte Kilogramm Kunststoffabfall. Letzteres Politikziel wurde bereits in Form der EU-Kunststoffabgabe (vgl. Kapitel 2.4.4) umgesetzt.<sup>70,71,72,73</sup>

### 2.4.4 EU-Kunststoffabgabe

Seit dem 1. Januar 2021 ist die EU-Kunststoffabgabe auf nicht recycelte Kunststoffabfälle in Kraft getreten. Dadurch wurde für die Mitgliedsstaaten der EU ein Anreiz geschaffen, Verpackungsabfälle zu reduzieren und Kunststoffrecycling im Sinne der Kreislaufwirtschaft zu begünstigen. Definiert wird die Menge nicht recycelter Kunststoffabfälle als die Differenz

---

<sup>70</sup> Vgl. NABU (2020), S. 3.

<sup>71</sup> Vgl. Europäische Kommission (2020).

<sup>72</sup> Vgl. IHK (o. D.).

<sup>73</sup> Vgl. Mederake et al. (2020), S. 24.

zwischen dem Gewicht der in einem Jahr angefallenen Verpackungsabfälle und der im selben Jahr recycelten Menge.

Nicht recycelte Verpackungsabfälle aus Kunststoff sind mit einer Abgabe von 0,80 EUR/kg zu begleichen. Vorübergehend werden die anfallenden Transfersummen noch aus den jeweiligen Staatshaushalten der Mitgliedsstaaten finanziert. Aus Deutschland fließen somit jährlich 1,3 Mrd. EUR Transfergelder aus Steuermitteln an die EU. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass eine Anpassung hin zum Verursacherprinzip vorgenommen wird. Konkret bedeutet das, dass in Zukunft nicht mehr der Staat die Abgabe zahlt, sondern die verpackungsherstellenden bzw. die in Verkehr bringenden Unternehmen.<sup>74,75,76,77,78</sup>

### 2.4.5 Deutsches Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG)

Das Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG) überführt die EU-Abfallrahmenrichtlinie und einzelne Regelungen der EU-Einwegkunststoffrichtlinie 2019/904/EU in deutsches Recht und wurde am 1. Juni 2012 verabschiedet. Mit der Neuerung der EU-Abfallrahmenrichtlinie im Jahr 2018 wurde auch das Kreislaufwirtschaftsgesetz novelliert und am 29. Oktober 2020 erneut in Kraft gesetzt. Ziel des Gesetzes ist es, die Kreislaufwirtschaft durch Abfallvermeidung und Abfallrecycling zu fördern. Dafür werden in erster Linie folgende regulatorischen Instrumente genutzt:

- Produktverantwortung und Obhutspflicht,
- Vermischungsverbot und Getrenntsammlungspflicht,
- freiwillige Rücknahme sowie
- Pflichten der öffentlichen Hand.

---

<sup>74</sup> Vgl. VerpackG(2019).

<sup>75</sup> Vgl. Europäische Kommission (2021).

<sup>76</sup> Vgl. Hesselmann Service GmbH (2022).

<sup>77</sup> Vgl. IHK (2020a).

<sup>78</sup> Vgl. EUWID (2021).

Konkret beinhaltet das Kreislaufwirtschaftsgesetz Vorgaben für einzelne Abfallströme, eine Anhebung der Wiederverwendungs- und Recyclingquoten sowie eine neue Vorschrift zum Ende der Abfalleigenschaft.

Zudem wird die zuvor dreistufige Abfallhierarchie um die Punkte „Vorbereitung zur Wiederverwendung“, „Recycling“ und „sonstige Verwertung“ erweitert (vgl. Abbildung 6).<sup>79,80,81,82,83,84</sup>

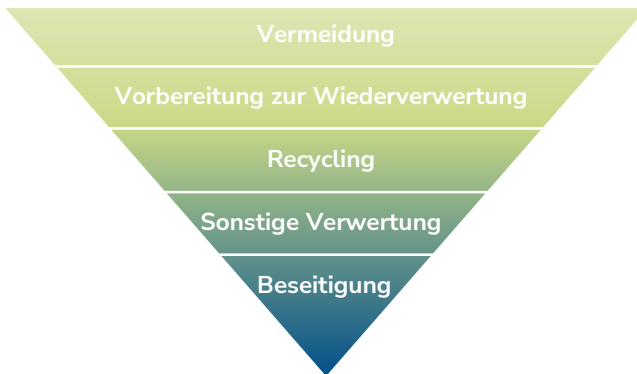


Abbildung 6: Abfallhierarchie gemäß Kreislaufwirtschaftsgesetz<sup>85</sup>

## 2.4.6 Verpackungsgesetz (VerpackG)

Das deutsche Verpackungsgesetz (VerpackG) setzt seit 2019 die EU-Verpackungsrichtlinie 94/62/EG in deutsches Recht um. Im Jahr 2021 wurde das Gesetz novelliert. Seit dem 3. Juli 2021 implementiert das VerpackG sowohl die EU-Einwegkunststoffrichtlinie als auch die EU-Abfallrahmen-

---

<sup>79</sup> Vgl. BMUV (2021).

<sup>80</sup> Vgl. BMUV (2020).

<sup>81</sup> Vgl. IHK (2020b).

<sup>82</sup> Vgl. Umweltbundesamt (2022a).

<sup>83</sup> Vgl. Mederake et al. (2020), S. 13.

<sup>84</sup> Vgl. Turuc, A. (2021), S. 14.

<sup>85</sup> Eigene Darstellung aus VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH (2022).

richtlinie in deutsches Recht. Mithilfe des Gesetzes sollen die Umweltauswirkungen von Verpackungsabfällen vermieden oder verringert werden. Es gilt für alle Verpackungen, die in Deutschland in Verkehr gebracht werden, und reguliert folgende Prozesse:

- Inverkehrbringen von Verpackungen,
- Rücknahme, Informationsbereitstellung und Nachweisen von Verpackungsabfällen sowie
- hochwertige Verwertung von Verpackungsabfällen.

Im Rahmen des Verpackungsgesetzes sind je nach Verpackungstyp, Materialfraktion und Einsatzbereich (B2B/B2C) unterschiedliche Maßnahmen vorgesehen. So müssen sich beispielsweise Herstellende, Händlerinnen und Händler sowie Importunternehmen, die als Erstinverkehrbringende von systembeteiligungspflichtigen B2C-Verpackungen in Deutschland auftreten, einem (dualen) System anschließen und sich bei der Stiftung Zentrale Stelle Verpackungsregister (ZSVR) registrieren.

Die Registrierungspflicht gilt ab Juli 2022 für sämtliche Herstellunternehmen von mit Ware befüllten Verpackungen. Unternehmen, die besonders große Mengen von Verpackungen erstmalig in Deutschland in Verkehr bringen und systembeteiligungspflichtig sind, müssen sich zusätzlich einmal jährlich eine sogenannte Vollständigkeitserklärung (VE) über die im Vorjahr in Verkehr gebrachte Verpackungsmenge testen lassen und beim Verpackungsregister abgeben. Erstinverkehrbringende und Folgevertriebe von B2B-Verpackungen müssen ähnliche Verpackungsabfälle kostenfrei zurücknehmen und einer ordentlichen Verwertung zuführen. Dies gilt auch für Mehrwegverpackungen. Darüber hinaus können herstellende Unternehmen ihre Produkte freiwillig mit den europäischen Recyclingcodes (Verwertungskreislauf, Verpackungsmaterial, Werkstoffgruppe)

kennzeichnen, um Auskunft über die Kunststofffraktion ihrer Verpackungen zu geben.<sup>86,87</sup>

### **Recyclingquoten, Verwertungsquoten und Mindestrezyklatanteile**

Das VerpackG schreibt vor, Kunststoffverpackungen zu min. 90 Ma.-% einer Verwertung zuzuführen. Dabei müssen ab dem 1. Januar 2022 min. 70 Ma.-% dieser Verwertungsquote durch werkstoffliche Verwertung erreicht werden. Außerdem wurde die Recyclingquote für Kunststoffabfälle seit dem Jahr 2021 auf 63 Ma.-% erhöht. Für Einwegkunststoffgetränkeflaschen fällt ein Mindestrezyklatanteil von 25 Ma.-% ab dem Jahr 2025 und von 30 Ma.-% ab dem Jahr 2030 an.<sup>88,89</sup>

Derzeit werden von verschiedenen Agierenden in Deutschland und in der EU Mindestquoten für den Rezyklatanteil in Kunststoffprodukten gefordert. Dabei werden zwei unterschiedliche Ansätze verfolgt: produktspezifische Rezyklateinsatzquoten und material- oder polymerspezifische Substitutionsquoten. Neben den Rezyklateinsatzquoten werden außerdem preisliche Steuerungsmechanismen diskutiert.<sup>90</sup>

#### **2.4.7 Brancheninitiative der Industrievereinigung Kunststoffverpackungen e.V.**

Der deutsche Branchenverband Industrievereinigung Kunststoffverpackungen e.V. (IK) empfiehlt den Rezyklateinsatz für Verpackungen und ruft die herstellenden Unternehmen und Verwendenden von Kunststoffverpackungen auf, bis 2025 in Deutschland jährlich insgesamt 1 Mio. t Rezyklate einzusetzen. Dazu werden zusätzliche 500 kt Rezyklate benötigt. Aller-

---

<sup>86</sup> Vgl. VerpackG (2019).

<sup>87</sup> Vgl. Turuc, A. (2021), S. 22.

<sup>88</sup> Vgl. Recycling Service GmbH (o. D.).

<sup>89</sup> Vgl. Bvse (o. D.).

<sup>90</sup> Vgl. IK e. V. und AGVU (2020).



dings sind Kunststoffrezyklate gegenwärtig noch nicht in der angestrebten Menge am Markt vorhanden, insbesondere hohe Qualitäten sind rar.

Die IK empfiehlt daher die konsequente Umsetzung von Ecodesign bzw. recyclinggerechtem Design bei Kunststoffverpackungen, um die Qualität der Inputmaterialien für die stoffliche Verwertung zu erhöhen. Eine Toolbox zur Inspiration für recyclinggerechtes Öko-Design steht online zur freien Verfügung. Mithilfe des frei zugänglichen Webtools „Recyclass“ lässt sich beispielsweise die Recyclingfähigkeit von Kunststoffverpackungen bewerten.<sup>91</sup>

## 2.5 Herausforderungen und Lösungsansätze beim Rezyklateinsatz

Das vom BMBF geförderte Projekt DiLinK hat **Hemmnisse in der Wertschöpfungskette des Kunststoffrecyclings** empirisch untersucht und folgende Hürden beim Einsatz von Rezyklaten identifiziert:<sup>92</sup>

- Mangelndes Vertrauen in recycelte Kunststoffe und die Recycler.
- Mangelndes Wissen über die Qualitäten und Eigenschaften von Rezyklaten.
- Mangelnde Transparenz zu Materialeigenschaften.
- Mangelnde Datenverfügbarkeit und mangelnder Datenaustausch hinsichtlich zuverlässiger Rezyklatverfügbarkeit.

Außerdem erschweren häufig die folgenden Aspekte einen Rezyklateinsatz in der Praxis:<sup>93</sup>

- strenge Anforderungen an die Qualität der Produkte, die aus Rezyklaten hergestellt werden,

---

<sup>91</sup> Link zum Onlinetool Recyclass: <https://recyclass.eu>

<sup>92</sup> Vgl. DiLinK (2020).

<sup>93</sup> Vgl. DiLinK (2020).

- geringer Preisvorteil der Rezyklate gegenüber Neuware bei gleichzeitigem Mehraufwand für die Beschaffung und Qualitätsprüfung auf Nachfrageseite.

Gegenwärtig liegen die größten Hemmnisse beim Einsatz von Rezyklaten in der eingeschränkten Verfügbarkeit hochwertiger Qualitäten. Aufgrund der stark gestiegenen Nachfrage nach Rezyklaten herrscht eine Verknappung auf der Angebotsseite, woraus ein Preisanstieg resultiert. Laut Fachleuten wird sich der Rezyklatpreis höchstwahrscheinlich weiterhin auf hohem Niveau halten, bis die Angebotsseite die Nachfrageseite hinreichend bedienen kann.

Als weiteres Hemmnis sind Chargenschwankungen und Inhomogenität der Rezyklate zu nennen. Nicht nur zwischen verschiedenen Chargen, sondern auch innerhalb einer Charge kann es bei PCR aufgrund unterschiedlicher Qualitäten zu Schwankungen im Kunststoffverarbeitungsprozess kommen. Durch die Auswahl geeigneter Rezyklatquellen mit möglichst homogenem Inputstrom lassen sich daraus Produkte mit im Vergleich zu Neuware fast gleichwertigen Eigenschaften realisieren. Aufgabe der Prozessleitung und Qualitätskontrolle ist es, solche Schwankungen abzufedern und im Idealfall bei Bedarf direkt gegenzusteuern. Dies ist mit entsprechenden Inline-Messverfahren möglich. Darunter sind Messungen zu verstehen, die im laufenden Fertigungsprozess erfolgen. Entsprechende Messapparaturen erfassen kontinuierlich Daten, wodurch eine stetige Prozessüberwachung möglich ist. Bei Abweichungen vom Sollwert kann auf diese Weise direkt gegengesteuert werden. Anders als bei bisher eingesetzten Offline-Messverfahren, wie beispielsweise der Prüfung von Probekörpern oder Bauteilen im Labor, kann diese moderne Technologie die Prozessparameter von Spritzgussmaschinen in Echtzeit steuern. Damit eröffnet sich ein Spielraum für Toleranzen bei den verwendeten Werkstoffen, wodurch sich auch Rezyklate besser verarbeiten lassen. Die Forschungseinrichtung SKZ - Das Kunststoff-Zentrum hat beispielsweise ein neues Inline-Messsystem zur Erkennung von Fremdpartikeln in der Kunststoffschmelze entwickelt und 2021 kommerziell auf den Markt gebracht.

Mittels ultraschall- und radarbasierten Prüfsystemen zur Inline-Detektion von nichtmetallischen und metallischen Fremdmaterialien werden Qualitätseinbußen im fertigen Bauteil deutlich reduziert.<sup>94,95</sup>

Eine weitere Herausforderung hinsichtlich des Rezyklateinsatzes stellen produktfremde Additive dar. Kommen Rezyklate aus anderen Anwendungsbereichen zum Einsatz, können die darin enthaltenen Additive für die Zielanwendung störend sein bzw. den Einsatz sogar verhindern. Einzuhaltende Normen und zu erfüllende Zielgruppenanforderungen können ebenfalls ein Hemmnis beim Rezyklateinsatz darstellen.

Angesichts der oben beschriebenen Schwierigkeiten kunststoffverarbeitender Unternehmen im Zusammenhang mit Chargenschwankungen und Inhomogenitäten der Rezyklate laufen derzeit verschiedene Forschungs- und Innovationsprojekte. Digitale Lösungen auf Basis künstlicher Intelligenz (KI) finden sich beispielsweise in der Entwicklung und sollen den Informationsaustausch zwischen Rezyklaterzeugung und -anwendung erleichtern.

Das BMBF-geförderte Projekt „Circularity Optimisation for Plastics“ (CYCLOPS) entwickelt KI-basierte Datenverarbeitungs- und Analysemethoden auf Basis eines sogenannten digitalen Zwillings für Sekundärrohstoffe.<sup>96</sup> Dieses KI-System soll als Erweiterung der bestehenden Online-Handelsplattform für Rezyklate „cirplus“ (vgl. Kapitel 2.1.3) eine anwendungsfreundliche Bewertung der Eigenschaften und Aufbereitungsmöglichkeiten von Rezyklaten ermöglichen. Ziel ist es, einen transparenten Informationsaustausch im Wertstoffkreislauf für Kunststoffe herzustellen, einschließlich technischer Merkmale, Mengenprognosen für verschiedene Rohstoffqualitäten und deren ökologischer Performance.

---

<sup>94</sup> Vgl. SKZ - Das Kunststoff-Zentrum (2021c).

<sup>95</sup> Vgl. Keyence (2023).

<sup>96</sup> Vgl. Werner. J. (2021).

Ein weiteres BMBF-gefördertes Projekt „SmaKuRez“ bezweckt die Entwicklung einer smarten Service-System-Datenbank für Kunststoffrezyklate, die für Kunststoffverarbeitende die Anwendung von Post-Consumer-Rezyklaten erheblich vereinfachen soll.<sup>97</sup> Dazu werden anwendungsbezogene Rezyklatqualitäten definiert und in Anwendungsklassen eingeordnet. Das Projekt definiert und erfasst die Qualitäts- bzw. Performancekriterien für verschiedene Anwendungsbereiche von Kunststoffen. Die daraus erstellte Datenbank wird kunststoffverarbeitende Unternehmen befähigen, für bestimmte Produkte und Herstellungsprozesse passende Rezyklatmischungen und Prozessparameter zu ermitteln und für die Qualitätssicherung zu dokumentieren. Zudem werden auch zertifizierte, fertig gemischte und additivierte Rezyklatmischungen mit 30 bis 100 % Rezyklatanteil entwickelt. Weiterhin wird ein Online-Tool namens Rezy-Spezi entwickelt, das mit der Handelsplattform „Plastship“ (vgl. Kapitel 2.1.3) implementiert werden soll.<sup>98</sup> Mit diesem Tool sollen einheitliche Bewertungsgrundlagen für den Rezyklateinsatz in verschiedenen Anwendungsbereichen ermöglicht werden.

Das Forschungs- und Kooperationsprojekt „PlasticBOND“, gefördert durch das BMBF, beinhaltet eine nachhaltige Optimierung von Kunststoffverpackungen durch Entwicklungsvorhaben zu detailliertem Materialwissen und digitalen Services.

Das Projekt unterteilt sich in drei Vorhaben:

- Bewertung der ökologischen Nachhaltigkeit,
- Prozess- und Materialanalyse und
- Kooperationsmodelle in digitalen Wertschöpfungsnetzen.

---

<sup>97</sup> Vgl. Kunststoff-Zentrum SKZ (2021a).

<sup>98</sup> Vgl. Achenbach, H. (2022).

Ziel ist es, eine B2B-Plattform zu etablieren, die zu einer Ökobilanzierung entlang der kunststoffverarbeitenden Wertschöpfungskette infolge des Datenaustauschs innerhalb des Netzwerks befähigt.<sup>99</sup>

Das KI-Anwendungshub Kunststoffverpackungen, gefördert durch das BMBF, besteht aus zwei Innovationslaboren. Das KIOpti-Pack befasst sich mit einer ganzheitlichen, KI-basierten Optimierung von Kunststoffverpackungen mit Rezyklatanteil mit Fokus auf Design und Produktion. Das K3I-Cycling bearbeitet die KI-gestützte Optimierung der Kreislaufführung von Kunststoffverpackungen. Dazu kooperieren insgesamt 51 Assoziierte aus Wirtschaft, Wissenschaft und Gesellschaft, die über einen intensiven Daten- und Ergebnisaustausch das Ziel verfolgen, die Wertschöpfungskette Kunststoffverpackungen nachhaltig zu schließen.<sup>100</sup>

Im Jahr 2020 wurde das unternehmens- und branchenübergreifende Konsortium R-Cycle gegründet. Die 30 Mitglieder arbeiten zusammen an einem offenen und weltweit anwendbaren Rückverfolgungsstandard (digitaler Produktpass), sodass eine lückenlose Dokumentation und Verfolgbarkeit entlang der Wertschöpfungskette für recycelbare Verpackungen ermöglicht werden.<sup>101</sup>

---

<sup>99</sup> Vgl. PlasticBOND (2022).

<sup>100</sup> Vgl. KI Hub Kunststoffverpackungen (2023).

<sup>101</sup> Vgl. R-Cycle (2023).

## 3 METHODISCHES KONZEPT DER STUDIE

### 3.1 Ökologische und ökonomische Bewertungsmethoden

Für die wissenschaftlich fundierte Bewertung sowie den Vergleich der ökologischen und ökonomischen Aspekte der Werkstoffwahl für Produktverpackungen wird das methodische Konzept des Lebenszyklusansatzes bzw. der Produkt-Ökobilanz (*Life Cycle Assessment, LCA*) genutzt. Damit lassen sich die relevantesten positiven wie negativen Umweltwirkungen eines Produktsystems sowie ökonomische Indikatoren nachvollziehbar analysieren. Die Berücksichtigung des gesamten Produktlebenswegs stellt dabei sicher, dass die Bewertung alle wesentlichen Einflussfaktoren mit einbezieht.

Mögliche Zielkonflikte und Problemverlagerungen werden so beispielsweise von Umweltbelastungen zwischen den einzelnen Lebenswegabschnitten sowie zwischen verschiedenen Umweltaspekten bzw. Umweltmedien erkannt. Aufgrund der berücksichtigten Prozesse wird der Lebenszyklusansatz auch als Cradle-to-grave-Ansatz (dt. von der Wiege bis zur Bahre) bezeichnet.

Diese Studie verwendet eine zielgruppenorientierte Adaption der Standard-Ökobilanzmethodik, die auf die Informationsbedürfnisse von KMU zugeschnitten ist. Unter Anwendung der generellen Vorgehensweise für Ökobilanzen nach Standard DIN EN ISO 14040/14044 erfolgt die ökologische Wirkungsabschätzung zudem auf Basis der VDI-Richtlinien VDI 4600 und VDI 4800 Blatt 2.<sup>102</sup>

Die ökonomische Bewertung der im Rahmen der Studie betrachteten Verpackungsvarianten basiert ebenfalls auf dem Lebenszyklusansatz und bezieht sich auf die gleiche funktionelle Einheit. Hierzu wird eine vergleichende Kostenanalyse unter Berücksichtigung der Investitions- und Betriebskosten (in EUR) durchgeführt. Diese werden durch Berechnung aller

---

<sup>102</sup> Vgl. DIN EN ISO 14040:2006.

mit dem betrachteten Produkt verbundenen Kosten ermittelt, die direkt durch einen oder mehrere Agierende im Lebenszyklus dieses Produkts getragen werden.<sup>103</sup> Dazu gehören Kosten in der gesamten Wertschöpfungskette und Nutzungsphase bis zur Entsorgung.<sup>104</sup> So kann bei einem direkten Vergleich der Untersuchungsobjekte festgestellt werden, welche Option aus ökonomischer Sicht und aus der Perspektive eines oder einer bestimmten Agierenden (im vorliegenden Fall die Zielgruppe der KMU) insgesamt am besten abschneidet. Zugleich ist es möglich zu ermitteln, in welchem Zeitraum sich notwendige Investitionen amortisieren bzw. wo sich die Gewinnschwellen verorten lassen (*Break-Even-Point*).

Die methodischen Grundlagen für die Durchführung von Kostenanalysen sind für unterschiedliche Anwendungen in verschiedenen internationalen und nationalen Standards und Richtlinien verankert.<sup>105</sup> Einige Aspekte werden auch von konventionellen Methoden der Investitionskostenrechnung behandelt.

### 3.1.1 Modelle zur ökologischen Wirkungsabschätzung

Zur vergleichenden Beurteilung der Verpackungsvarianten werden anerkannte Indikatoren, die die Umweltauswirkung bewerten, genutzt. Diese basieren auf wissenschaftlich verifizierten Berechnungsmodellen, die im Folgenden kurz erläutert werden:

#### Treibhauspotenzial (THG-Potenzial), Carbon Footprint

Der Indikator „Treibhauspotenzial“ bezeichnet die gewichtete Summe aller klimarelevanten Emissionen von Treibhausgasen (THG) entlang des gesamten Lebenszyklus der betrachteten Produkte. Der THG-Betrag trägt die Einheit Kohlenstoffdioxid-Äquivalente ( $\text{CO}_{2\text{eq}}$ ) und wird auch als  $\text{CO}_2$ -Fußabdruck (*Carbon Footprint*) bezeichnet. Er beschreibt sämtliche

---

<sup>103</sup> Vgl. Hunkeler et al. (2008).

<sup>104</sup> Zukünftige Geldflüsse werden dabei typischerweise diskontiert, wobei sowohl Inflationsraten als auch typische Zinssätze in Betracht gezogen werden.

<sup>105</sup> Vgl. ISO 15663-2:2001.

Treibhausgasemissionen, die sich direkt oder indirekt den Lebensstadien von Produkten zuordnen lassen. Treibhausgase im Sinne dieser Definition sind nicht nur Kohlenstoffdioxid, sondern all diejenigen Gase, für die vom Weltklimarat IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*) ein Koeffizient für das Treibhauspotenzial (*Global Warming Potential, GWP*) definiert wurde. Da diese Gase jeweils unterschiedlich stark klimawirksam sind, werden alle relevanten Treibhausgase auf sogenannte Kohlenstoffdioxid-Äquivalente  $\text{CO}_{2e}$  umgerechnet. Für die Betrachtung des Treibhausgaspotenzials wird auf die aktuelle Bewertungsmethode ReCiPe 2016 Midpoint (H) aus dem Methodenpack V 2.1.2 von GreenDelta für openLCA zurückgegriffen. Diese Methode verwendet die aktuellen Werte der IPCC zur Umrechnung sämtlicher relevanten Emissionen in  $\text{CO}_{2e}$ -Äquivalente.<sup>106</sup>

Der produktbezogene THG-Gesamtbetrag ergibt sich aus der Zuordnung aller in der Sachbilanz inventarisierten Stoff- und Energieströme auf THG-Emissionsfaktoren, die in wissenschaftlich verifizierten Datenbanken verzeichnet sind. Konkret erfolgen die einzelnen Rechenschritte zur Zuordnung der Sachbilanz auf klimarelevante Emissionen mithilfe einer Ökobilanz-Software.

### **Kumulierter Energieaufwand (KEA)**

Der Kumulierte Energieaufwand (KEA) ist ein Indikator für die Summe der unterschiedlich eingesetzten primären Energieformen, die in einem Produkt während seines gesamten Lebenszyklus direkt oder indirekt eingesetzt werden, damit es seine Funktion erbringen kann. Dazu werden gemäß den Berechnungsvorgaben der Norm VDI 4600:2012-01 die mit der Herstellung (KEAH), Nutzung (KEAN), und Entsorgung/dem Recycling (KEAE) verbundenen Energieverbräuche berechnet und summiert.

Für die Berechnung wird zunächst für jede der betrachteten Verpackungsvarianten eine Massen- und Stoffbilanz auf Basis der bereitgestellten

---

<sup>106</sup> Vgl. IPCC (2021).



Inventardaten erstellt, die anschließend mit KEA-Daten aus einschlägigen Datenbanken verknüpft wird (vgl. Kapitel 4.1). Neben der Darstellung des gesamten KEAs als Summenwert der Einzelbeiträge werden außerdem der kumulierte Energieaufwand aus erneuerbaren energetischen Ressourcen  $KEA_{\text{erneuerbar}}$  sowie der kumulierte Energieaufwand aus nicht erneuerbaren Ressourcen  $KEA_{\text{nicht erneuerbar}}$  als Teilsumme ausgewiesen.

Für die Betrachtung des kumulierten Energieaufwandes wird die Methodik aus der VDI-Richtlinie 4600 „Kumulierter Energieaufwand (KEA) – Begriffe, Berechnungsmethoden“ angewandt. Erfasst werden hier zum einen die regenerativen Energieträger Biomasse, Wasser, Wind, Solarstrahlung und Geothermie, zum anderen die erschöpflichen fossilen und nuklearen Energieträger. Die Aufsummierung der genannten Energieträger ergibt den  $KEA_{\text{gesamt}}$ .

### **Kumulierter Rohstoffaufwand (KRA)**

Regeln für die Bilanzierung des kumulierten Rohstoffaufwandes (KRA) sind in der VDI-Richtlinie 4800 Blatt 2 dargelegt. Zur Bilanzierung des KRA werden „alle zur Erbringung des Nutzens im Rahmen der Bilanzgrenzen benötigten Primärrohstoffe quantifiziert. Sekundärrohstoffe werden nur mit ihrem Transport- und Aufbereitungsaufwand berücksichtigt.“<sup>107</sup> In Anhang A der VDI-Richtlinie 4800 Blatt 2 finden sich für eine Reihe mineralischer und metallischer Rohstoffe tabellierte KRA-Werte in der Einheit t/t.

### **Wasserverbrauch**

Für die Betrachtung des Wasserverbrauchs der beiden zu vergleichenden Farbeimer-Varianten wird die aktuelle Bewertungsmethode ReCiPe 2016 Midpoint (H) aus dem Methodenpack V 2.1.2 von GreenDelta für openLCA angewendet.

---

<sup>107</sup> VDI 4800 Blatt 2:2018-03.

### 3.1.2 Modelle zur ökonomischen Bewertung

In der Kostenanalyse werden alle relevanten Kosten (ausgedrückt in EUR und bezogen auf die funktionelle Einheit) ermittelt, die mit einem bestimmten Produkt verbunden sind und direkt durch einen oder mehrere Agierende im Lebenszyklus dieses Produkts getragen werden.

#### **Betriebskosten (Kosten für Betriebsstoffe, Wartung, Entsorgung etc.)**

Auf Basis der Betriebskosten kann bei einem direkten Vergleich unterschiedlicher Untersuchungsobjekte festgestellt werden, welche Variante aus der Perspektive eines oder einer bestimmten Agierenden (im vorliegenden Fall die Zielgruppe der KMU) insgesamt die wirtschaftlichste Option darstellt. Gleichzeitig kann ermittelt werden, in welchem Zeitraum sich notwendige Investitionen amortisieren bzw. wo sich die Gewinnschwellen verorten lassen (*Break-Even-Point*).

## 3.2 Untersuchungsrahmen der Studie

Der Untersuchungsrahmen beschreibt das zu untersuchende Produktsystem und dessen Funktionen sowie die vor- und nachgelagerten Prozesse, die im gesamten Produktlebenszyklus in Betracht zu ziehen sind. Im Rahmen der vorliegenden ökologischen Vergleichsrechnung werden zwei Varianten des Verpackungsproduktes „Farbeimer aus Polypropylen“ gleicher Füllmenge miteinander verglichen. Die Grundfunktion bzw. der Nutzen der verglichenen Produktvarianten besteht darin, fertig vorbereitete Wandfarbe für die gewerbliche und private Endanwendung am Ort ihrer Verwendung (z. B. auf Baustellen oder für Renovierungsarbeiten) bereitzustellen. Der Fokus dieser Studie liegt auf der Analyse des Einflusses der verwendeten Werkstoffe Polypropylen-Neuware versus Rezyklat, um die ökologische und ökonomische Performance der Farbeimer-Varianten zu evaluieren. Daher berücksichtigt der Untersuchungsrahmen auch die Recyclingprozesse zur Herstellung des Polypropylen-Rezyklats.

### 3.2.1 Beschreibung der betrachteten Verpackungsvarianten

Die zu untersuchenden Verpackungsvarianten stellen zwei funktional identische Typen von Farbeimern mit einem Füllvolumen von 10 l dar (vgl. Abbildung 7). Beide Varianten sind Monomaterialprodukte, d. h., sie bestehen nahezu vollständig aus Polypropylen (PP).

- Jokey-Monomaterialeimer (JETO+ 110-01) aus 100 % PP-Neuware.
- Jokey-Monomaterialeimer (JETO+ 110-01 REC) aus LVP-basiertem PP-Rezyklat mit ca. 5 % Anteil PP-Neuware



Abbildung 7: Schematische Darstellung des Farbeimersystems JETO+ 110-01 der Firma Jokey SE © Jokey SE

### 3.2.2 Funktionelle Einheit

Im Zuge der ökologischen und ökonomischen Vergleichsrechnung gilt es, die damit zusammenhängenden Stoff- und Energieströme ebenso wie die Kostendaten einer einheitlichen Bezugsgröße zuzuordnen. Hierzu wird eine funktionelle Einheit festgelegt. Die ISO 14040 beschreibt die funktionelle Einheit als den quantifizierten Nutzen eines Produktsystems für die Verwendung als Vergleichseinheit.<sup>108</sup> Die funktionelle Einheit muss dem Ziel und dem Untersuchungsrahmen der Studie entsprechen. Das bedeutet im hier vorliegenden Fall, dass sie einen direkten Vergleich der ökologischen und ökonomischen Kennzahlen der betrachteten Verpackungsvarianten ermöglicht. Aus diesem Grund werden alle entsprechenden stofflichen sowie energetischen Input- und Outputmengen (sogenannter

---

<sup>108</sup> Vgl. DIN EN ISO 14040:2006.

Referenzfluss) über den gesamten Lebenszyklus der Verpackungen dieser Bezugsgröße zugeordnet.

### **Funktionelle Einheit**

Herstellung einer für den Einzelhandelsmarkt attraktiven Verpackung für die sichere und haltbare Aufbewahrung, den Transport, die Lagerung und Verwendung von Wandfarben in einer handelsüblichen Gebindegröße von zehn Litern.

Zur Herleitung der funktionellen Einheit für die zu untersuchenden Verpackungsvarianten wurden die einzelnen Funktionsmerkmale systematisch analysiert. Dies erfolgte auf Basis der von der Firma Jokey zur Verfügung gestellten Informationen. Für Kunststoffverpackungen stellt der Schutz des verpackten Inhalts den zentralen Daseinszweck dar. Diese Funktion beinhaltet nicht nur die Aufbewahrung und Handhabung des verpackten Produkts während der Lagerung, des Transports und Vertriebs, sondern auch die sichere Anwendung bei der Endabnehmerschaft. Außerdem erfüllt eine Verpackung zugleich eine Marketingfunktion. Ein weiteres Funktionselement von Verpackungen sind Informationen über den Inhalt, die in Form eines Etiketts oder einer Lackierung auf der Verpackungsoberfläche gut sichtbar aufgebracht werden.

### **3.2.3 Systemgrenze der Bilanzierung**

Zur Festlegung des Untersuchungsrahmens gehört die eindeutige Darstellung der Systemgrenze, also eine Beschreibung der in der Studie berücksichtigten Prozesse (vgl. Abbildung 8) im gesamten Lebenszyklus der beiden Verpackungsvarianten.

Die in dieser Untersuchung dargestellten Berechnungen basieren auf der Annahme, dass die verschiedenen Verpackungsvarianten grundsätzlich gleiche Nutzungseigenschaften im Hinblick auf die Funktion während der Befüllung, Transporte, Kühlung und Nutzung bei den Anwendenden aufweisen. Deshalb wird das zur Befüllung der Farbeimer vorgesehene

Produkt – folglich die Wandfarbe – in dieser Studie nicht berücksichtigt, da dessen Eigenschaften keinen Einfluss auf den Vergleich der Verpackungsvarianten haben. Die Lebenszyklusabschnitte Befüllung und Nutzung sind Bestandteil des Untersuchungsrahmens, jedoch werden die darauf bezogenen Teilprozesse (z. B. Transporte) von der Berechnung ausgeklammert (grau hinterlegt), da sie bei beiden Verpackungsvarianten identisch sind.

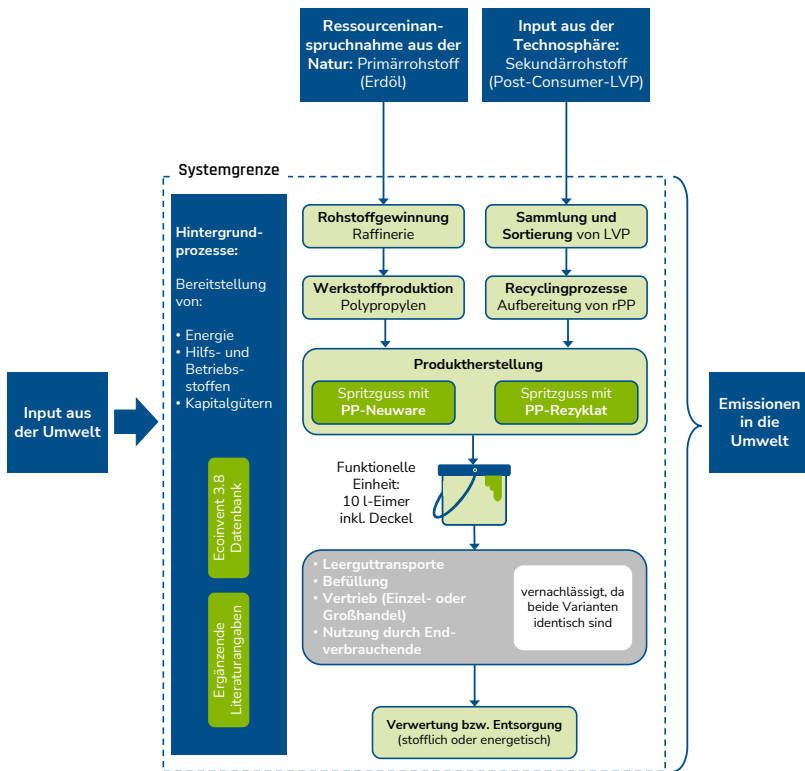


Abbildung 8: Übersicht zu in der Fallstudie berücksichtigten Teilprozessen innerhalb der betrachteten Systemgrenze © Öko-Institut

Folgende Lebenszyklusabschnitte der Farbeimer wurden berücksichtigt:

- Extraktion von Rohstoffen aus der Natur und deren industrielle Weiterverarbeitung zu Rohmaterialien und Energieträgern für den Eimer aus Primärrohstoffen und die Sammlung und Sortierung von LVP für den Eimer aus Sekundärrohstoffen,
- Herstellungsprozess (Werkstoffproduktion und Recyclingprozess) der Eimer mit Henkel sowie separatem Deckel (es wird für jeden Eimer ein Deckel benötigt, das Verhältnis der hergestellten Eimer und Deckel ist 1 : 1),
- Entsorgung und Verwertung der Eimer (End-of-Life-Phase, energetische Verwertung).

**Nicht berücksichtigt** sind folgende Lebenszyklusabschnitte und Prozesse:

- Produktionsanlagen und Infrastruktur, z. B. Herstellung der Recyclinganlagen und Spritzgussmaschinen oder der Transportfahrzeuge,
- Transportprozesse der leeren Farbeimer zum Abfüller einschließlich Nutzung von Um- und Transportverpackungen,
- Herstellung des Füllguts (Wandfarbe),
- Anwendungsphase bei Endanwendenden, einschließlich Einkaufsfahrten und Lagerung. Es wurde angenommen, dass es hierbei keine Unterschiede zwischen den betrachteten Verpackungsvarianten gibt.

### 3.2.4 Allokationsregeln

Als Allokationsregel werden die Methoden zur Aufteilung der Umweltbelastung und möglicher Gutschriften bezeichnet. Die zu verwendende Allokationsregel kann einen erheblichen Einfluss auf das Ergebnis der Ökobilanz ausüben. Ihre Festlegung basiert daher auf einem umfassenden Systemverständnis des Kunststoffrecyclings und Produktionsprozesses.

Falls im Herstellungsprozess auch Koppelprodukte entstehen, müssen die in der Ökobilanz ermittelten Umweltlasten entsprechend auf Haupt- und

Nebenerzeugnis aufgeteilt werden. Als Koppelprodukte gelten dabei alle Erzeugnisse, die keine Abfälle sind (also einen positiven Marktwert haben). Bei der Herstellung der hier betrachteten Verpackungsvarianten sind keine Koppelprodukte bekannt. Daher besteht im Herstellungsprozess der Farbeimer keine Notwendigkeit für eine Allokation. Jedoch entstehen im vorgelagerten Recyclingprozess der Leichtverpackungsabfälle neben Polypropylen-Rezyklat noch eine Vielzahl anderer Fraktionen (z. B. Metalle, Zellulose, andere Kunststoffe), die als Koppelprodukte gelten. Hier wird eine massebasierte Allokationsregel zugrunde gelegt, d. h., die Umweltlasten der einzelnen Recyclingschritte werden den Outputfraktionen entsprechend deren Masseanteil zugerechnet. Außerdem erfordert die Wiederverwendung rezyklierter Materialien eine Festlegung von Allokationsregeln für die Umweltbelastung durch Herstellung der Neuware auf den ersten und zweiten Lebenszyklus. Das Gleiche gilt für Gutschriften, die sich aus der thermischen Abfallbehandlung ergeben.

Im Fall des verwendeten Polypropylen-Rezyklats erfolgte eine Allokation der ermittelten Umweltbelastung auf den ersten und den hier betrachteten zweiten Lebenswegabschnitt des Kunststoffes. Da die Herkunft des PP-Rezyklats aus LVP-Abfällen den ersten Lebensweg des PP als Verpackungsmaterial nahelegt, wurde die vorherrschende Entsorgungspraxis für den überwiegenden Teil der LVP-Abfälle (thermische Verwertung) in Betracht gezogen. Hierbei wurden auch die in anderen Studien getroffenen Annahmen<sup>109</sup> und Informationen aus den geführten Interviews mit Fachleuten mitberücksichtigt.

Das Basisszenario (0/100) legt somit fest, dass die Rezyklate aus den LVP einerseits keine Umweltlasten (0 %) aus der ursprünglichen Herstellung der LVP und andererseits die Gutschriften und Umweltlasten (100 %) aus der letztlichen Verwertung nach der Nutzung tragen. Der erste (originäre PP-LVP) und zweite (PP-Rezyklat) Lebensabschnitt werden entsprechend getrennt voneinander betrachtet. Für das PP-Rezyklat wird die

---

<sup>109</sup> Vgl. Dehoust et al. (2016), S. 43ff.

sogenannte Cut-off-Regel angewandt (vgl. Tabelle 3). Dies entspricht der VDI-Richtlinie 4800 Blatt 2, die festlegt, dass keine Gutschriften aus dem ursprünglichen Leben erfolgen, mit dem Ziel, den tatsächlichen Rohstoffaufwand zu honorieren.

**Tabelle 3: Aufbau des Basisszenarios**

	1. Lebenszyklus: originäre PP-LVP	2. Lebenszyklus: PP-Rezyklat
<b>Basisszenario (0/100)</b>		
Umweltlasten aus der Herstellung der originären PP-LVP aus Neuware	100 %	0 %
Umweltlasten und Gutschriften aus der Verwertung nach dem 2. Lebenszyklus (EoL)	0 %	100 %

### 3.2.5 Anforderungen an die Datenqualität und -herkunft

#### Datenqualität

Zur Erstellung der für die Untersuchung erforderlichen Datenbasis werden bestimmte Anforderungen an die erhobenen Daten gestellt. Generell wurden sowohl spezifische als auch generische Daten verwendet. Entsprechend der in Ökobilanzen üblichen Praxis wurden spezifische Daten für die im Fokus stehenden Prozesse (z. B. Rezyklatgewinnung und Spritzgussherstellung der Farbeimer) mithilfe von Fragebögen erhoben:

- LVP-Sortierung und stofflicher Verwertungsprozess in den dualen Systemen,
- Produktionsdaten zum Farbeimer und zugehörigen Deckel<sup>110</sup>.

Generische Daten stammen im Allgemeinen aus LCA-Datenbanken und weiteren Literaturquellen sowie aus Angaben von befragten Expertinnen und Experten. Für die Vorketten der zur Herstellung der Farbeimer verwendeten Neuware und Energieträger wurden generische Daten aus

<sup>110</sup> Vgl. Jokey SE (2022).



Literatur und der Ecoinvent-v3.8-Datenbank<sup>111</sup> verwendet, die zum Zeitpunkt der Untersuchung die aktuelle Version war. Für Ecoinvent als Datengrundlage wurde sich entschieden, weil die Datenbank eine breite Verfügbarkeit für die vorliegende Untersuchung relevanter Datensätze enthält. Zudem können diese Daten im Hinblick auf Systemgrenzen und in Bezug auf die Wirkungsabschätzung in sich konsistent verwendet werden und liegen in einer vergleichsweise ausführlichen und transparenten Dokumentation vor.

Die umzusetzende ökologische Vergleichsrechnung wurde als „attributive Ökobilanz“ modelliert. Dementsprechend wurden ausschließlich solche Datensätze verwendet, die dem Systemmodell „Allocation at Point of Substitution (APOS)“ der Ecoinvent-Datenbank entstammen oder aber einer Systemlogik folgen, die diesem Allokationsansatz methodisch entspricht.

Mit den Anforderungen an Daten und Datenqualität werden in allgemeiner Form die Merkmale der Daten festgelegt, die für die Durchführung einer Ökobilanz benötigt werden. Die verwendeten generischen Datensätze aus den Datenbanken wurden grundsätzlich so ausgewählt, dass sie den in dem zu untersuchenden System auftretenden Materialien und Prozessen möglichst nahekommen. Außerdem wurde ein zeitnaher und räumlicher Bezug zum Untersuchungsgegenstand dieser Studie hergestellt. Nachstehend werden die in dieser Studie zugrunde gelegten Anforderungen übersichtsartig zusammengefasst:

- **Zeitbezogener Geltungsbereich:** In dieser Studie bilden die verwendeten Daten zu Vor- und Nachketten den repräsentativen mittleren Stand der Technik ab. Das heißt, sowohl die primären als auch die spezifischen Daten sollten nicht älter als zwei Jahre sein. Die sekundären Datensätze aus Ecoinvent v3.8 beziehen sich auf unterschiedliche Zeitspannen, wobei die letzte Aktualisierung der Ecoinvent-Datenbank im Jahr 2021 erfolgt ist.

---

<sup>111</sup> Vgl. Ecoinvent (2022).

- **Räumlicher Geltungsbereich:** Der geographische Bezugsraum ist Deutschland, insbesondere auf Ebene der Eimerproduktion und der End-of-Life-Prozesse. Auf Ebene der Bereitstellung von Vorprodukten und Materialien, z. B. Herstellung der Kunststoffgranulate oder der Chemikalien, wurde auf Datensätze aus der Datenbank Ecoinvent v3.8 zurückgegriffen. Dabei wurde angenommen, dass es sich um am Weltmarkt zugekaufte Rohmaterialien handelt. Daher wurden, soweit nicht genauer spezifiziert, globale Datensätze genutzt, die sich auf durchschnittliche Marktverhältnisse beziehen.
- **Technologischer Erfassungsbereich:** Die verwendeten primären und spezifischen Daten bilden grundsätzlich den aktuellen Stand der Technik im Jahr 2022 ab. Es wurde die neueste IML-Produktionslinie der Firma Jokey am Standort Wipperfürth betrachtet. Die End-of-Life-Szenarien entsprechen der derzeitigen technologischen Praxis bei den LVP-Kunststoffverwertungsunternehmen in Deutschland.

### Datenherkunft

Die Daten über den LVP-Recyclingprozess (Sammlung, Sortierung und Verwertung) beruhen auf Untersuchungen zu den dualen Systemen<sup>112</sup>. Außerdem wurden anhand von Interviews Einschätzungen von Fachleuten einbezogen. Die Daten über Gewichte und Materialzusammensetzung sowie die Produktion der Farbeimer beruhen auf Primärdaten der Firma Jokey. Für Jokeys Produktionsdaten gilt ein Bezugszeitraum zwischen 2021 und 2022. Die Daten über die End-of-Life-Behandlung der Farbeimer beruhen auf Untersuchungen zu den dualen Systemen.

### 3.2.6 Abschneidekriterien

Bei der Erstellung einer Ökobilanz werden häufig hochkomplexe Prozesse analysiert und dazu Daten erfasst. Im Hinblick auf die Machbarkeit ist es allerdings genauso notwendig, bestimmte Aspekte zu vernachlässigen, die sich nur wenig auf das Gesamtergebnis auswirken. In der Praxis der

---

<sup>112</sup> Vgl. Bulach et al. (2022).

Ökobilanz gibt es daher für die Entscheidung, welche Inputs in die Abschätzung einzubeziehen sind, wie z. B. Masse, Energie und Umweltrelevanz, anerkannte Abschneidekriterien.<sup>113,114</sup>

Für die hier vorliegende vergleichende ökologische Bewertung der betrachteten Verpackungsvarianten können eine Reihe von Einflussfaktoren vernachlässigt werden, weil davon auszugehen ist, dass diese nur einen geringen Einfluss auf das Ergebnis haben. Die zu vernachlässigenden Einflussfaktoren werden mithilfe der Abschneidekriterien ermittelt. Diese definieren die Stoffmenge eines Energieflusses oder des Grades der Umweltrelevanz in Verbindung zu Prozessmodulen oder Produktsystemen, die von einer Studie auszuschließen sind.<sup>115,116</sup> Die verwendeten Abschneidekriterien und die Annahmen, auf denen sie beruhen, werden im Folgenden kurz ausgeführt:

- **Masse:** Bei der Anwendung der Masse als Kriterium ist die Aufnahme aller Inputs in die Studie erforderlich, die kumulativ mehr als 5 % Anteil zum Masseninput des zu modellierenden Produktsystems beitragen.
- **Energie:** Auch für die Anwendung der Energie als Kriterium wird die Aufnahme aller Inputs in die Studie erforderlich, die kumulativ mehr als 5 % Anteil zum Energieinput des Produktsystems beitragen.
- **Umweltrelevanz:** Die Umweltrelevanz dient insofern als Kriterium, als die Aufnahme aller Inputs in die Studie erforderlich ist, die kumulativ mehr als 5 % Anteil zum Gesamtergebnis der ausgewerteten Wirkungsindikatoren des Produktsystems beitragen. Die Vorgaben zur Datenqualität bezüglich der Masse werden in der vorliegenden Studie eingehalten, d. h., sämtliche im Zuge der Datenerhebung erfassten Inputs

---

<sup>113</sup> „Als Abschneidekriterien bezeichnet man in der Ökobilanz die Festlegung der Stoffmenge, eines Energieflusses oder des Grades der Umweltrelevanz, die/der mit Prozessmodulen oder Produktsystemen verbunden sind, welche von einer Studie auszuschließen sind.“ – DIN EN ISO 14040:2006.

<sup>114</sup> Vgl. DIN EN ISO 14044:2018-05.

<sup>115</sup> Vgl. DIN EN ISO 14040:2006.

<sup>116</sup> Vgl. DIN EN ISO 14044:2018-05.

sind in der Bilanz berücksichtigt, soweit sie zusammen mehr als 5 % des gesamten Masseninputs ausmachen. Die Sachbilanzdaten für die Bereitstellung der PP-Rezyklate aus LVP-Abfällen werden in der vorliegenden Bilanz auf Basis der in Bulach et al. (2022) erhobenen Daten bilanziert.

Die Datenqualität dieser Studie entspricht den oben genannten Anforderungen. Das Kriterium bezüglich der bilanzierten Materialien- und Energieverbräuche wird für die Produktion im Werk der Firma Jokey eingehalten, da die Bilanz auf den in der Produktion gemessenen bzw. in den entsprechenden Abrechnungen (Stromrechnung, Gasrechnung) nachgewiesenen Verbräuchen basiert.

### **3.3 Inventarisierung der Sachbilanz**

#### **3.3.1 Daten für die ökologische Bewertung**

Im Rahmen der Inventarisierung wurden Daten zu ökologisch und ökonomisch relevanten Aspekten in den folgenden drei Geltungsbereichen erhoben. Die ökologische Vergleichsrechnung berücksichtigt alle drei der nachfolgend skizzierten Geltungsbereiche für die betrachteten Produktvarianten entlang ihres gesamten Lebenswegs.

#### **Standortbezogene Perspektive („gate“)**

Auf dieser Ebene fokussiert sich der Lebenszyklusansatz auf die Bewertung von Materialien beziehungsweise von Produktionsprozessen, insbesondere um den Energie- und Ressourcenverbrauch der Produktherstellung einzuschätzen.

In Tabelle 4 und Tabelle 5 sind die aus dem untersuchten Fallbeispiel des Spritzgussprozesses bei der Firma Jokey SE erhobenen Vordergrunddaten zu relevanten Input- und Output-Parametern in aggregierter Form dargestellt. Alle Mengen sind dabei bezogen auf die funktionelle Einheit (vgl. Kapitel 3.2.2).

Tabelle 4: Sachbilanz der Inputs in den Herstellungsprozess

Inputs	Farbeimer aus Primärkunststoff	Farbeimer aus Recyclingkunststoff
Rohware/Vorprodukte	Menge in kg	Menge in kg
PP-Pellets	0,4 (Neuware)	0,374 (Rezyklat) 0,020 (Neuware)
Farbpigmente	0,008	0,0083
andere Additive	0,00031	0,00030
Inmould-Label Eimer	0,01	0,011
Deckel	0,096	0,102
Inmould-Label Deckel	0,0025	0,0025
Hilfs- und Betriebsstoffe	Menge in kg	Menge in kg
Kältemittel	0,000000284 0,0000000126	0,000000291 0,0000000129
Leitungswasser	0,049	0,050
Schmieröl	0,00252	0,00258
Verpackungsmaterial 1 Schrenzpapier	0,000216	0,000216
Verpackungsmaterial 2 LDPE Folie	0,00211	0,0021
Verpackungsmaterial 3 Europalette	0,064	0,064
Verpackungsmaterial 4 Klebeband	0,0000657	0,0000657
Verpackungsmaterial 5 Pappe	0,000576	0,000576
Energieträger	Menge in kWh	Menge in kWh
Elektrizität	0,337	0,344
Wärmeenergie	0,0137	0,0135
Transporte	Entfernung in km	Entfernung in km
LKW (25 t Gesamtgewicht)	300	300

Die Inventarisierung der Sachbilanz für die Rezyklatgewinnung aus der stofflichen Verwertung der LVP-Abfälle erfolgt auf Basis von Kennwerten, die von Cyclos HTP bereitgestellt wurden.<sup>117</sup>

<sup>117</sup> Vgl. Institut Cyclos HTP GmbH (2022).

**Tabelle 5: Sachbilanz der Outputs aus dem Herstellungsprozess**

Inputs	Farbeimer aus Primärkunststoff*	Farbeimer aus Recyclingkunststoff*
Abfälle	Menge in kg	Menge in kg
PP-Verluste, z. B. Verschnitt /Ausschuss	0,000213	0,000218
Verpackungsabfälle	keine	keine
Gewerbemüll	0	0
Altöl/Fettabfälle	0,00252	0,00258
Abwasser	Menge in kg	Menge in kg
Abwasser	0	0

Der spezifische Output-bezogene Energieverbrauch für die Herstellung der hier betrachteten PP-Fraktion lässt sich allenfalls in grober Näherung abschätzen:

- Spezifischer Energieverbrauch der LVP-Sortierung: ca. 50 kWh/t Input

Der Energieverbrauch der rPP-Regranulat-Herstellung ist stark verfahrensabhängig. Im Zuge der vorliegenden Studie wurde mit einem durchschnittlichen Energieaufwand (Strom) von 1,2 kWh/kg rPP und einem Wasserverbrauch von 0,7 l/kg rPP gerechnet. Darüber hinaus fließt noch die Verwertung von 0,26 kg Recyclingresten (thermische Verwertung) in die ökobilanzielle Bewertung mit ein. Im Folgenden sind die Ausbeuten der LVP-Sortierung sowie des PP-Recyclings angeführt:

- Ausbeute der LVP-Sortierung: 49 % PP-LVP bezogen auf den Input,
- Ausbeute im Recycling: 70 – 74 % PP-Rezyklat bezogen auf den Input.

### **Vorketten-Perspektive (in Richtung „cradle“)**

Hier liegt das Augenmerk auf der Bewertung und den Lieferketten aller von Zuliefernden beschafften Vorerzeugnisse und dabei im Besonderen der Ermittlung der „ökologischen Rucksäcke“ der verwendeten Stoffe und Energien. Das gilt vor allem für die Betrachtung von Produkten, die Recyclingmaterialien enthalten.

Dabei ist davon auszugehen, dass der Lebensweg einer Verpackung aus Recyclingmaterialien nicht erst mit der Gewinnung von Kunststoffrezyklaten aus LVP-Abfällen beginnt, sondern bereits mit der Extraktion und Aufbereitung der Primärrohstoffe (Erdöl) zu Primärkunststoffen. Kunststoffe, aus denen die (im Einzelnen nicht bekannten) rezyklierten LVP bestehen, wurden in der Sachbilanz auf Basis von Einträgen aus der Ecoinvent-Datenbank abgebildet. Dabei wurde eine generische Allokationsregel angewendet (vgl. Kapitel 3.2.4). Weiterhin werden die Umweltauswirkungen der Abfallsortierung und Verwertungsprozesse von Kunststoffabfällen zur Erzeugung des Kunststoffrezyklats berücksichtigt.

### **Nachketten-Perspektive („gate to grave“)**

Diese Aspekte umfassen die Distribution und Befüllung der Nutzungsphase der Farbeimer, die Nutzungsphase und die Prozesse am Ende des Lebenszyklus (z. B. erneutes Recycling, Abfallverbrennung etc.) Da sich beide Produktvarianten hinsichtlich ihrer Gebrauchseigenschaften nicht unterscheiden, unterliegen sie in der Praxis prinzipiell den gleichen Anwendungsvorgängen. So hat der überwiegend aus Rezyklatkunststoff bestehende Farbeimer fast gleichwertige mechanische Eigenschaften und Produktlebensdauern wie der Farbeimer aus Kunststoffneeware. Aus diesem Grund existiert beispielsweise kein Unterschied hinsichtlich der Stapelbarkeit der Gebinde auf Europaletten und infolgedessen der Transporte mittels LKW.

Auch mit Blick auf die thermische Verwertung der Farbeimer am Ende ihres Lebenswegs (End-of-Life) wird in beiden Varianten der gleiche Brennwert als Ersatzbrennstoff in der Zementherstellung angenommen. Da beide Produktvarianten in der Nachketten-Perspektive nahezu identische Eigenschaften aufweisen, wird an dieser Stelle auf eine detaillierte Darstellung dieser Aspekte verzichtet.

### 3.3.2 Daten für die ökonomische Bewertung

Für die Kostenanalyse des LVP-Sortier- und Recyclingprozesses gilt, dass etwa 70 % der Behandlungskosten auf allgemeine Vorgänge wie Transport, Verpressung, Entstaubung, Stahlbau, Brandschutz usw. entfallen.

- Sortierkosten (Behandlungskosten): ca. 80 EUR/t Input,
- Erlöse für Rezyklat: Tagespreis<sup>118</sup>.

---

<sup>118</sup> Die Preise waren in der Vergangenheit an den Virgin-Prozess gekoppelt (ca. 80 % vom Neuwarenpreis), aktuell liegen die Preise für Rezyklate nachfragebedingt darüber; für hohe Qualitäten wird sogar ein Vielfaches dessen berechnet (Stand: Oktober 2022).



## 4 VERGLEICHENDE ÖKOLOGISCHE UND ÖKONOMISCHE BEWERTUNG

### 4.1 Ökologische Bewertung

#### 4.1.1 Kumulierter Energieaufwand

Die Ergebnisinterpretation für den kumulierten Energieaufwand (KEA) ist auf den ersten Blick recht umfangreich und aufwendig, weshalb hierfür einige Hintergrundinformationen nötig sind. Sofort ersichtlich ist jedoch, dass der Neuware-Eimer im Vergleich zum Rezyklateimer einen deutlich höheren kumulierten Energieaufwand aufweist. Die negativen Werte sind bei beiden Eimer-Varianten vor allem auf die Gutschriften (Strom sowie Wärme) im Rahmen der End-of-Life-Phase zurückzuführen (vgl. Abbildung 9).

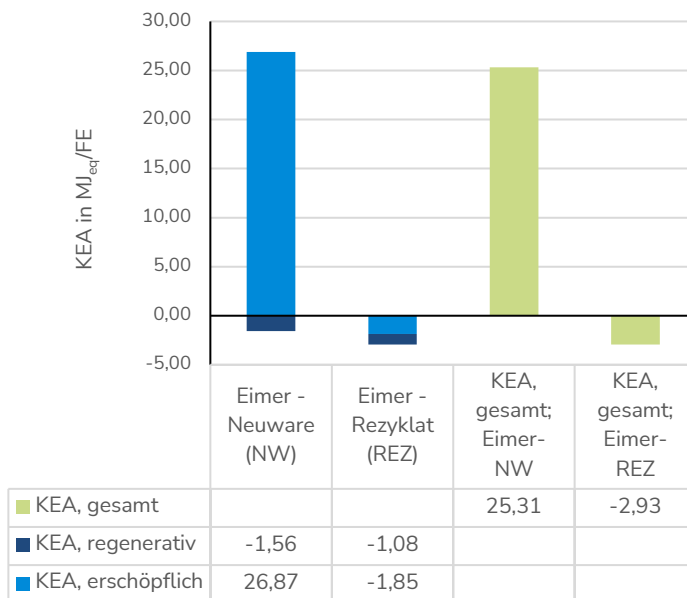


Abbildung 9: Kumulierter Energieaufwand je funktioneller Einheit

In Abbildung 9 sind links die Einzelwerte des KEA, regenerativ (in Dunkelblau) und KEA, erschöpflich (in Mittelblau) für beide Varianten separat dargestellt. Rechts sind die Nettobalken KEA, gesamt (in Grün) für die Neuware- und Rezyklatvariante wiedergegeben. Wie bereits oben erwähnt, ist der KEA, gesamt des Rezyklateimers negativ, d. h., bei der thermischen Verwertung des PP wird mehr Energie gewonnen, als für den Recyclingprozess und zur Herstellung des Eimers benötigt wird.

Zudem ist ersichtlich, dass die Energieformen erschöpflich (fossil) und regenerativ (Biomasse) bei beiden Eimer-Ausführungen ergebnisbestimmend sind. Beim Neuware-Eimer geht der Primärenergieeinsatz ( $MJ_{eq}$ ) erschöpflich fast ausschließlich auf die Herstellung des PP zurück. Bei der Rezyklatvariante hingegen wird angenommen, dass das Material der LVP-Abfälle ohne Primärenergieeinsatz – sprich lastenfrei – in das Recyclingsystem gelangt.

#### 4.1.2 Kumulierter Rohstoffaufwand

Es werden vier verschiedene Arten des kumulierten Rohstoffaufwands (KRA) unterschieden<sup>119</sup>:

- der energetische KRA,
- der metallische KRA,
- der biotische KRA sowie
- der Rohstoffaufwand für Bau- und Industriemineralien.

Die Ergebnisse für den kumulierten Rohstoffaufwand der betrachteten Produktvarianten sind in Abbildung 10 dargestellt. Links sind die Einzelindikatoren des KRA für beide Eimer-Varianten separat wiedergegeben, rechts die Nettowerte KRA, „gesamt“ für die Neuware- und Rezyklatvariante.

---

<sup>119</sup> Vgl. VDI 4800 Blatt 2:2018-03.

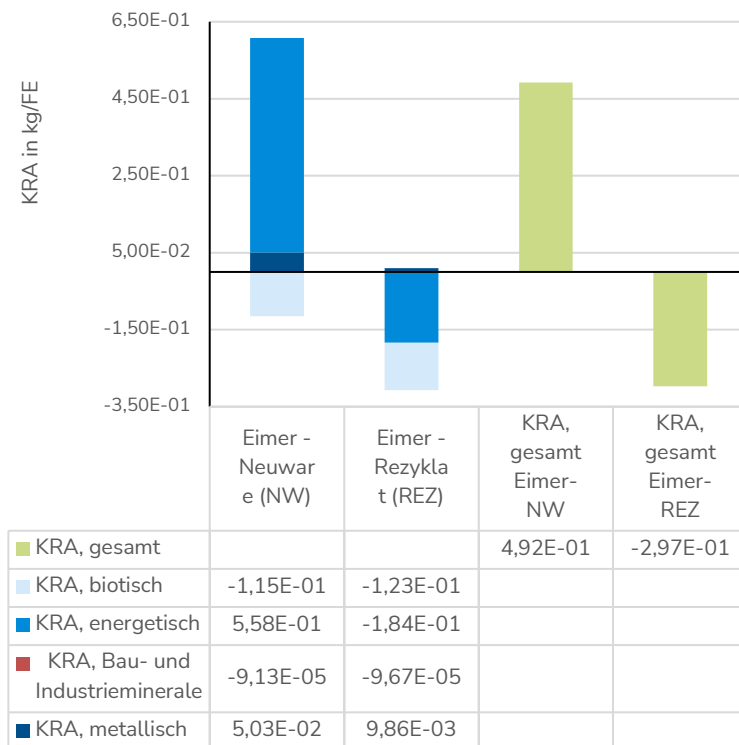


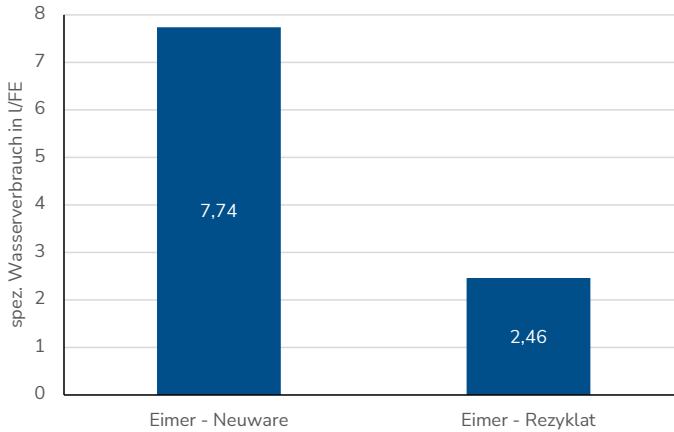
Abbildung 10: Kumulierter Rohstoffaufwand je funktioneller Einheit

Es ist ersichtlich, dass der KRA „energetisch“ bei beiden Eimer-Varianten das Gesamtergebnis dominiert. Beim Neuware-Eimer tragen die Rohstoffgewinnung und Werkstoffproduktion des PP zu 85 % zum KRA bei. Beim Rezyklateimer hingegen sind es das PP-Recycling und der Spritzgussprozess, jedoch mit niedrigerem Gesamtwert als beim Neuware-Eimer. Der KRA des Rezyklateimers ist (analog zum KEA) negativ, da die LVP-Abfälle lastenfremd in die untersuchte Systemgrenze einfließen (vgl. Kapitel 3.2.4). Die Verwertung der ausgedienten Rezyklateimer wird diesem System zu 100 % zugerechnet.

Der KRA „biotisch“ ist bei beiden Eimer-Varianten negativ. Grund hierfür sind die Gutschriften (Strom und Wärme) im Zuge der End-of-Life-Phase.

### 4.1.3 Wasserverbrauch

Der gesamte Wasserverbrauch für die betrachteten Produkte ist in Abbildung 11 dargestellt.



**Abbildung 11: Wasserverbrauch je funktioneller Einheit**

Die Ergebnisse zeigen, dass der Rezyklateimer nur in etwa ein Drittel (ca. 2,46 l/FE) des Wasserverbrauchs verglichen zum Neuware-Eimer (7,74 l/FE) aufweist. Im Vergleich zu anderen Herstellungsverfahren (wie beispielsweise bei der konventionellen und additiven Fertigungstechnik von Metallen<sup>120</sup>) fällt auf, dass der dortige Wasserverbrauch um ein Vielfaches höher ist. Je nach Fertigungsverfahren werden Verbrauchswerte zwischen 22 m<sup>3</sup>/FE und 145 m<sup>3</sup>/FE erreicht.

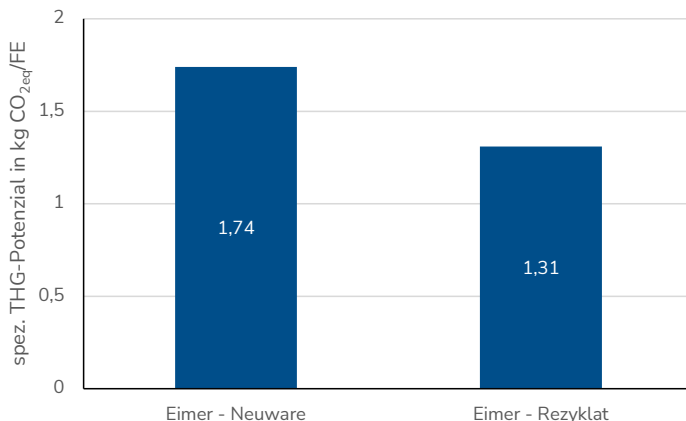
Der oben angeführte Vergleich der Fertigungsverfahren von Farbeimern zeigt, dass der Wasserverbrauch bei beiden Eimer-Varianten gering ist.

---

<sup>120</sup> Vgl. VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH (2019).

#### 4.1.4 Treibhausgasemissionen

Das summierte Treibhausgaspotenzial für die betrachteten Eimer-Varianten ist in Abbildung 12 grafisch dargestellt.



**Abbildung 12: Treibhausgaspotenzial je funktioneller Einheit**

Aus Abbildung 12 wird ersichtlich, dass der Rezyklateimer 25 % weniger Treibhausgasemissionen verursacht als der Neuware-Eimer. Im Folgenden sind die jeweiligen Lebenswegabschnitte und der prozentuale Beitrag zum Gesamtergebnis beider Eimer-Varianten angeführt.

Bei der Neuware-Variante entfallen 46 % der THG-Emissionen auf die Rohstoffgewinnung und PP-Produktion, 43 % auf die End-of-Life-Phase und 11 % auf die Produktherstellung. Ein anderes Bild zeigt sich beim Rezyklateimer. Hier entfallen 59 % der THG-Emissionen auf die End-of-Life-Phase (thermische Verwertung zu 75 % im Zementwerk und 25 % in der MVA) und 18 % auf den Herstellungsprozess (Spritzguss). Die Bereitstellung des PP-Rezyklats trägt nur zu 23 % zum gesamten THG-Potenzial bei (LVP-Sammlung = 2 %; Sortierung = 3,5 %; PP-Recycling = 17,5 %).

### 4.1.5 Inanspruchnahme von Flächen

Bei der Wirkungskategorie Inanspruchnahme von Flächen sind die Werte für beide Eimer-Varianten je funktioneller Einheit nahe Null und daher als nicht relevant einzustufen. Für Recyclingbetriebe und kunststoffverarbeitende Unternehmen sind jedoch der Flächenbedarf für Lagerung und Umschlag der Rohware und der Platzbedarf für den Warenausgang betriebswirtschaftlich relevante Aspekte. Der betriebliche Platzbedarf ist eine Frage der Optimierung betrieblicher Prozesse. Dieser Aspekt ist allerdings nicht Gegenstand der hier betrachteten Wirkungskategorie, die auf die Flächeninanspruchnahme in den Vorketten fokussiert ist.

## 4.2 Rohstoffkritikalität - Versorgungsrisiko

Für die Bewertung der Kritikalität eingesetzter Rohstoffe wird die Methodik aus der VDI-Richtlinie 4800 Blatt 2 „Ressourceneffizienz - Bewertung des Rohstoffaufwands“ genutzt. Die Richtlinie basiert auf einem System von 13 Indikatoren, die in drei Gruppen eingeteilt sind (vgl. Tabelle 6).

Tabelle 6: Indikatoren der VDI-Richtlinie 4800 Blatt 2

Geologische, technische und strukturelle Indikatoren	Geopolitische und regulatorische Indikatoren	Ökonomische Indikatoren
Verhältnis von Reserven zu globaler Jahresproduktion	Herfindahl-Hirschman-Index der Reserven	Herfindahl-Hirschman-Index der Unternehmen
Grad der Koppelproduktion/Nebenproduktion	Herfindahl-Hirschman-Index der Länderproduktion	Grad der Nachfragesteigerung
Verbreitungsgrad funktionaler End-of-Life-Recyclingtechnologien	Politisches Länderrisiko	Technische Machbarkeit und Wirtschaftlichkeit von Substitutionen in Hauptanwendungen
Wirtschaftlichkeit von Lagerung und Transport	Regulatorisches Länderrisiko	Annualisierte Preisvolatilität
Verbreitungsgrad natürlicher Vorkommen/Anbaugelände		

Jeder Rohstoff erhält für jeden Indikator eine Bewertung, wobei die Bewertungsskala von 0 bis 1 reicht und die Zwischenschritte 0,3 und 0,7 beinhaltet. Eine Bewertung einzelner Rohstoffe wird über eine Zahl vorgenommen. Hierbei werden die einzelnen Indikatorwerte der Größe nach geordnet. Es werden Gewichtungsfaktoren  $G_i$ , nach der folgenden Formel berechnet:

$$G_i = \frac{2^{(i-1)}}{3^i}$$

Diese werden mit den Indikatorwerten multipliziert und nach der folgenden Formel zu einer Gesamtkritikalität addiert:

$$K_j = \frac{1}{\sum_{i=1}^j G_i}$$

Die VDI-Richtlinie 4800 Blatt 2 enthält für viele der zu betrachtenden Rohstoffe Bewertungen aufgrund von Berechnungen, Schätzungen und Expertenmeinungen. Die vollständige Tabelle mit den Indikatorwerten findet sich in der genannten Richtlinie<sup>121</sup>.

Im Zuge der Bilanzierung der beiden Eimer-Varianten erfolgte zudem eine Untersuchung der eingesetzten Metalle. Deren Zusammenstellung sowie die entsprechenden Massen, bezogen auf die funktionelle Einheit, können Tabelle 7 entnommen werden.

Da die beiden Eimer-Varianten vollständig aus PP bestehen, resultieren die dargestellten Werte ausschließlich aus den Prozessen der jeweiligen Vorketten.

---

<sup>121</sup> Vgl. VDI 4800 Blatt 2:2018-03.

Tabelle 7: Kritikalitätswerte für metallische Rohstoffe

Metall	Eimer-Neuware [kg/FE]	Eimer-Rezyklat [kg/FE]
Eisen	6,20E-04	1,30E-03
Aluminium	1,70E-04	6,40E-05
Titan	1,60E-04	1,79E-05
Kupfer	1,20E-04	-
Chrom	1,00E-04	1,97E-05
Zink	-	1,38E-05

Zudem erfolgte eine Bestimmung der Kritikalität von Erdgas und Erdöl. Deren Massen bzw. Volumina, bezogen auf die funktionelle Einheit, sind in Tabelle 8 aufgeführt:

Tabelle 8: Kritikalitätswerte für fossile Rohstoffe

Rohstoff	Eimer-Neuware [kg bzw. m <sup>3</sup> /FE]	Eimer-Rezyklat [kg bzw. m <sup>3</sup> /FE]
Erdöl [kg]	0,396	0,015
Erdgas [m <sup>3</sup> ]	0,820	~0

Anhand der Daten aus Tabelle 7 wird ersichtlich, dass im Rahmen der vorliegenden Studie Metalle kaum von Bedeutung sind. Grund hierfür ist, dass in den Vordergrunddaten weder Maschinen noch Werkzeuge berücksichtigt wurden. Zur Vollständigkeit erfolgte trotzdem eine Bewertung der Rohstoffkritikalität der identifizierten Metalle. In Tabelle 9 sind die normiert gewichteten Werte für beide Eimer-Varianten dargestellt:

Tabelle 9: Gewichtete Rohstoffkritikalität der identifizierten Metalle

Metall	Eimer-Neuware	Eimer-Rezyklat
Eisen	0,7322	0,7322
Aluminium	0,7655	0,7655
Titan	0,8349	0,8349
Kupfer	0,7259	-
Chrom	0,9282	0,9282
Zink	-	0,9163



Aufgrund der Tatsache, dass die identifizierten und in Tabelle 9 gelisteten Metalle massenmäßig gering sind, ist die Versorgungskritikalität – mit Ausnahme von Titan – als niedrig zu bewerten.

Eine andere Situation stellt sich hinsichtlich der Kritikalität von Erdöl und Erdgas dar. Für die Herstellung beider Eimer-Varianten sind fossile Rohstoffe nötig. In Tabelle 10 sind die normiert gewichteten Werte für Erdöl und Erdgas dargestellt:

**Tabelle 10: Gewichtete Rohstoffkritikalität für fossile Rohstoffe**

Rohstoff	Eimer-Neuware	Eimer-Rezyklat
Erdöl [kg]	0,688	0,688
Erdgas [m <sup>3</sup> ]	0,820	-

Die letzte Aktualisierung der Indikatoren erfolgte im Jahr 2018. Seitdem hat sich die geopolitische Lage aufgrund des Ukraine Konflikts allerdings verändert. So hat sich insbesondere die Versorgungskritikalität von Erdöl und Erdgas seit 2022 für Deutschland deutlich verschärft. Die hier gemäß den Indikatoren der VDI-Richtlinie 4800 Blatt 2 ermittelten Werte können daher aus heutiger Sicht (Stand Ende 2022) deutlich höher angesetzt werden.

### 4.3 Ökonomische Bewertung

Im Weiteren erfolgt zunächst eine orientierende Produktionskostenanalyse (inklusive Rohware, Betriebsstoffe, Energiekosten) und anschließend eine ökonomische Diskussion des Marktumfeldes sowie der Auswirkungen potenzieller legislativer Eingriffe. Eine an dieser Stelle typischerweise dargestellte Analyse der Lebenszykluskosten (analog zur ökologischen Vergleichsrechnung) ist im Hinblick auf den Untersuchungsgegenstand hin-fällig. Der Grund dafür liegt in dem Einsatz hochwertiger Rezyklate, der keine nennenswerten zusätzlichen Investitionen in Verarbeitungsapparate

erfordert.<sup>122</sup> Aus diesem Grund erscheint auch eine vergleichende Investitionskostenrechnung (mit Barwertrechnung, Zinsannahmen, Diskontfaktor etc.) als wenig zielführend. Dies gilt für Recyclingkunststoffe, in diesem Fall recycelte Polypropylen-Pellets, die bei der Inverkehrbringung auf dem inländischen Markt vergleichbare technische Verarbeitungsparameter aufweisen wie Neuware. So ist es beispielsweise möglich, die vorhandenen Maschinen (Plastifiziereinheiten im Spritzgießverfahren nach DIN 24450) anstatt mit Primär-PP-Pellets in gleicher Weise mit Recycling-PP-Pellets zu bestücken. Mit Blick auf die Kostenanalyse zeigt sich, dass der einzige variable Kostenfaktor die unterschiedlichen Einkaufspreise der beiden Rohstoffe in der Produktion sind (vgl. Kapitel 3.2.2). Alle weiteren Betriebskosten können unterdessen als gleich hoch („ceteris paribus“) angenommen werden.

### **4.3.1 Relative Kosten**

Die nachfolgende Analyse erfolgt auf Basis aggregierter Kosten zu den jeweiligen Herstellungsschritten. Aus Vertraulichkeitsgründen gegenüber dem Fallstudiengeber Firma Jockey können keine detaillierten, absoluten Kostendaten veröffentlicht werden. Stattdessen sind die relativen Kostenanteile in einer aggregierten und relativen Form dargestellt (vgl. Abbildung 13).

Die Kostenanalyse zeigt, dass für die Produktion der Kunststoffeimer fast ausschließlich der Einkaufspreis für Rohware (zwischen 54 und 62 % der gesamten spezifischen Produktionskosten) sowie sonstige Vorprodukte wie Additive (zwischen 37 und 45 %) ins Gewicht fallen.

Demgegenüber spielen sonstige Betriebsstoffe sowie spezifische Energiekosten pro Eimer eine zu vernachlässigende Rolle. Daraus lässt sich ableiten, dass Einkaufspreise – sowohl von Primär-PP-Pellets als auch Sekundär-PP-Pellets – eine hohe Elastizität bezogen auf die gesamte Kosten-

---

<sup>122</sup> Das gilt nur, sofern keine Fertigungsprozesse für Food- und Non-Food-Anwendungen im Produktionsablauf voneinander getrennt werden müssen.

struktur der Produktion nach sich ziehen. Das heißt, dass relative Preisänderungen der Rohware im Einkauf zu einem beachtlichen Anteil auch in die Preisgestaltung des Endproduktes eingehen.

Das hier dargestellte Beispiel zeigt also, dass es durchaus möglich ist, den untersuchten Kunststofffarbeimer kostengünstiger unter Rückgriff auf Recycling-PP zu produzieren als mit Primär-PP (vgl. Abbildung 13).

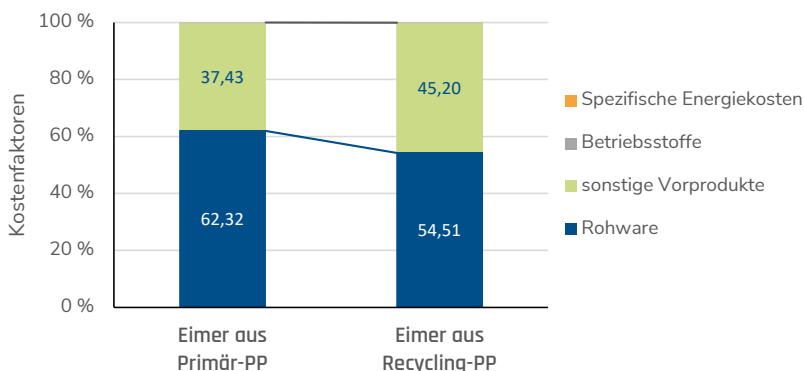
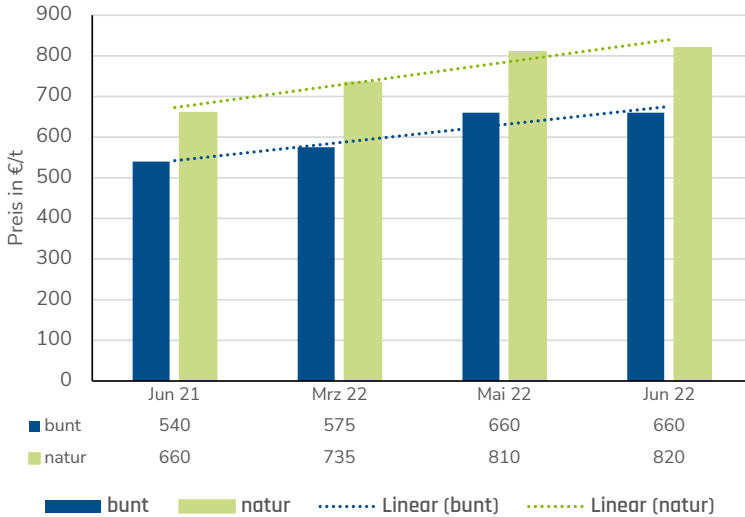


Abbildung 13: Vergleich relativer Kostenanteile bei der Produktion von Kunststoffeimern aus Primär-PP vs. recyceltem PP<sup>123</sup>

### 4.3.2 Preisentwicklungen und Marktumfeld

Wie zuvor bereits dargestellt, hat der Einkaufspreis von primären und sekundären Kunststoffpellets einen signifikanten Einfluss auf die gesamten Produktionskosten des Farbeimers. Da im betrachteten Fallbeispiel hochwertiges Sekundär-PP auf Basis langfristiger Lieferverträge beschafft wird (vgl. hierzu Kapitel 3.2), ist das Rezyklat im Vergleich die rentablere Option.

<sup>123</sup> Eigene Darstellung auf Basis von Daten, die von der Firma Jokey SE für die vorliegende Studie zur Verfügung gestellt worden sind.



**Abbildung 14: Preisentwicklung von sekundärem, homopolymeren PP-Altkunststoffen in Deutschland<sup>124</sup>**

Allerdings muss an dieser Stelle betont werden, dass das aktuelle Marktumfeld für hochwertige PP-Rezyklate aufgrund steigender Preise zunehmend angespannt ist. Wie Abbildung 14 zeigt, sind die relevanten Preise zwischen Juni 2021 und Juni 2022 um 20 bis 25 % gestiegen (Basis: Juni 2021). Grund dafür mag die maßgeblich gestiegene Nachfrage nach Sekundärkunststoffen aufgrund der sich verteuernden Primärkunststoffe infolge der aktuellen globalen energiepolitischen Entwicklungen und die damit einhergehende Verteuerung von Erdöl als Ausgangsrohstoff für Primärkunststoffe sein. Es ist aktuell also keineswegs eindeutig, dass kunststoffverarbeitende Betriebe das vorliegende Geschäftsmodell als „Blau-pause“ übernehmen können.

<sup>124</sup> Eigene Darstellung auf Basis von Euwid, Werte gemittelt.

## 4.4 Sensitivitätsanalyse

Bei der ökologischen Bewertung von Produkten mit Rezyklatanteil hat die verwendete Allokation eine zentrale Bedeutung für das Bilanzergebnis. Das bezieht sich auf die Verteilung der Umweltlasten zwischen dem ersten Lebenszyklus des PP in Form von Leichtverpackungen und dem betrachteten Produktsystem, in dem die Rezyklate Anwendung finden. In der ökobilanziellen Praxis, aber auch im wissenschaftlichen Diskurs wurde noch kein Konsens gefunden, welche Allokationsregel angewandt werden soll. Einen Versuch hat das süddeutsche Kunststoff-Zentrum (SKZ) zusammen mit der Deutschen Bundesstiftung Umwelt als fördermittelgebende Instanz gestartet. Im Zuge des Forschungsprojekts SCO2RE – CO<sub>2</sub>-Bilanzierung von technischen Kunststoffrezyklaten wurde 2021 zum einen ein Leitfaden mit Checkliste, zum anderen ein Methodenbericht zur Bilanzierung von Kunststoffrezyklaten herausgegeben. Die Dokumente können kostenfrei und ohne Anmeldung direkt von der Homepage des SKZ heruntergeladen werden.<sup>125</sup>

Im Folgenden wird ein kurzer Überblick über die beiden bilanzierten Szenario-/Sensitivitätsvarianten im Vergleich zum Basisszenario (0/100) gegeben.

Das **Szenario (50/50)** legt fest, dass die Rezyklate aus den LVP einerseits die Hälfte der Umweltlasten (50 %) aus der ursprünglichen Herstellung der LVP und andererseits die Hälfte der Gutschriften und Umweltlasten (50 %) aus der letztlichen Verwertung nach der Nutzung tragen. Die entstehenden Gutschriften und Umweltlasten des ersten (originäre PP-LVP) sowie des zweiten (PP-Rezyklat) Lebensabschnitts werden entsprechend zu gleichen Teilen auf beide Lebenszyklen verteilt (vgl. Tabelle 11).

Das **Szenario (50/100)** legt fest, dass die Rezyklate aus den LVP einerseits die Hälfte der Umweltlasten (50 %) aus der ursprünglichen Herstellung der LVP und andererseits alle Gutschriften und Umweltlasten (100 %) aus

---

<sup>125</sup> Vgl. SKZ – Das Kunststoff-Zentrum (2022).

der letztlichen Verwertung nach der Nutzung tragen. Die entstehenden Umweltlasten des ersten Lebensabschnitts (originäre PP-LVP) werden entsprechend zu gleichen Teilen auf beide Lebenszyklen verteilt, während die Gutschriften und Umweltlasten des zweiten (PP-Rezyklat) in Gänze diesem zugewiesen werden. Das Szenario (50/100) ist ein Extremszenario (vgl. Tabelle 11).

**Tabelle 11: Aufbau der Szenarien entsprechend den Allokationsregeln**

	1. Lebenszyklus: originäre PP-LVP	2. Lebenszyklus: PP-Rezyklat	
<b>Basisszenario (0/100)</b>			
Umweltlasten aus der Herstellung der originären PP-LVP aus Neuware	100 %	0 %	Basisszenario (0/100)
Umweltlasten und Gutschriften aus der Verwertung nach dem 2. Lebenszyklus (EoL)	0 %	100 %	
<b>Szenario (50/50)</b>			
Umweltlasten aus der Herstellung der originären PP-LVP aus Neuware	50 %	50 %	Szenario (50/50)
Umweltlasten und Gutschriften aus der Verwertung nach dem 2. Lebenszyklus (EoL)	50 %	50 %	
<b>Szenario (50/100) (Extremszenario)</b>			
Umweltlasten aus der Herstellung der originären PP-LVP aus Neuware	50 %	50 %	Szenario (50/100)
Umweltlasten und Gutschriften aus der Verwertung nach dem 2. Lebenszyklus (EoL)	0 %	100 %	

Die Gutschriften aus der Verwertung (EoL) ergeben sich aus der energetischen Verwertung

In Abbildung 15 sind die Ergebnisse der Sensitivitäts- bzw. Szenarienanalyse für die Wirkungskategorie Treibhausgaspotenzial den Basisszenarien gegenübergestellt.

Es ist ersichtlich, dass das Szenario (50/50) Eimer-Rezyklat fast genauso abschneidet wie das Basisszenario (0/100) Eimer-Rezyklat. Das Szenario (50/100) Eimer-Rezyklat ist als Extremszenario zu bezeichnen, da die Art

der Allokation deutlich zu Lasten des Rezyklates ausfällt. Der Wert bewegt sich hier auf dem Niveau der Neuware-Variante.

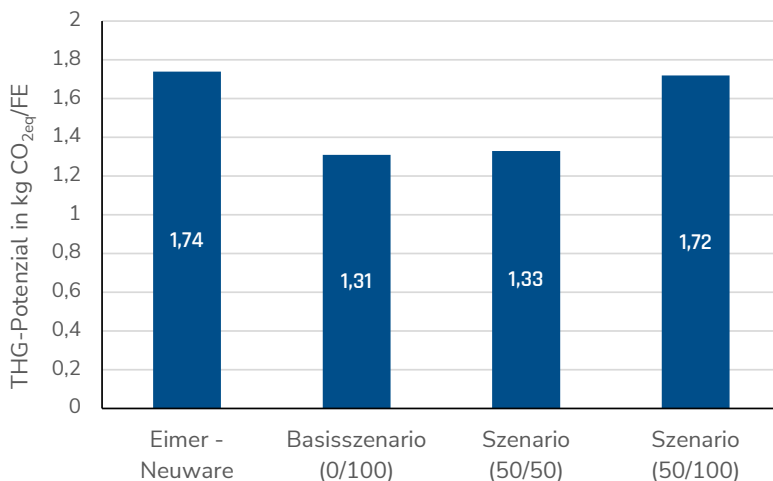


Abbildung 15: Vergleich Treibhausgaspotenzial der Szenarien

Hinsichtlich KEA (vgl. Abbildung 16) ergibt sich – verglichen mit der Wirkungskategorie Treibhausgaspotenzial – ein völlig anderes Bild.

Das Szenario (50/50) Eimer-Rezyklat schneidet im Vergleich zum Szenario (50/100) Eimer-Rezyklat schlechter ab. Grund hierfür sind die Gutschriften (Strom und Wärme) im Zuge der End-of-Life-Phase, die bei dem 50/100-Szenario komplett dem Rezyklateimer hinzuzurechnen sind. Dadurch verringert sich der KEA im Vergleich zum Szenario 50/50, bei dem nur 50 % der Gutschriften dem Rezyklateimer zugerechnet werden.

Unabhängig von der gewählten Allokationsregel schneidet der Rezyklateimer für alle betrachteten Umweltwirkungskategorien (KRA, KEA und THG-Potenzial) durchweg besser ab als der Neuware-Eimer.

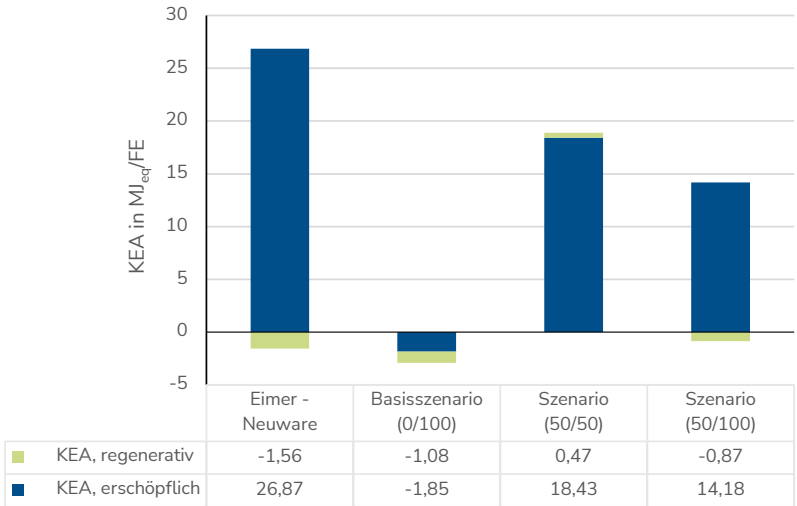


Abbildung 16: Vergleich von KEA-Basisszenarien mit Sensitivitätsszenarien

### Einschätzung der Relevanz und des Geltungsbereichs unter Berücksichtigung der getroffenen Annahmen

Die Verwendung von PP-Rezyklat bietet gegenüber der PP-Neuware ökologische Vorteile, weil die Umweltlasten aus der PP-Herstellung aus fossilen Rohstoffen (Erdöl) dem ersten Lebenszyklus anzurechnen sind. Außerdem wird der Brennwert des aus fossilen Rohstoffen erzeugten PP erst bei der thermischen Verwertung des Rezyklatprodukts in Form einer Gutschrift eingelöst. Demnach trägt die ursprünglich aus PP-Neuware hergestellte Einweg-Leichtverpackung definitionsgemäß zu allen materialspezifischen Beiträgen zum KRA, KEA und THG-Potenzial bei, während die Gutschrift der thermischen Verwertung dem Rezyklatprodukt zugutekommt.

Diese Festlegung der 0/100-Allokationsregel ist insofern plausibel, als bei PP-basierten Einweg-LVP, im Unterschied zu bepfandeten Einweg-Getränkeflaschen aus PET, kein geschlossener Stoffkreislauf erreicht wird.



Zwar sind PP-basierte LVP als recycelbar gekennzeichnet,<sup>126</sup> aber in der Praxis werden nur 55 % der in LVP enthaltenen Kunststoffe stofflich verwertet (Stand 2019).<sup>127</sup> Seit Anfang 2022 liegt die vorgegebene Verwertungsquote<sup>128</sup> für Kunststoffe in LVP-Abfällen bei 63 %. Dabei ist die stoffliche Verwertung zumeist mit einer Kaskadennutzung verbunden, d. h., aus den Rezyklaten entstehen nicht neue Verpackungen, sondern andere Produkte. Eine echte Kreislaufführung „Verpackung zu Verpackung“ – wie in dieser Studie beschrieben – findet bisher nur in geringem Umfang statt.

Die in diesem Fallbeispiel betrachtete hochwertige Rezyklatanwendung ist hingegen ein Beispiel für eine echte Kreislaufführung „Verpackung zu Verpackung“. Zwar ist auch der rezyklatbasierte Farbeimer eine Einwegverpackung, aber dessen gleichwertige Funktion ermöglicht eine echte Substitution von Einwegverpackungen aus PP-Neuware durch Einwegverpackungen aus Rezyklat am Endzielgruppenmarkt. Vor diesem Hintergrund ist die Anwendung der 0/100-Allokationsregel im Basisszenario gerechtfertigt und unterstreicht den ökologischen Vorteil der Rezyklate.

Die Resultate der Sensitivitätsanalyse verdeutlichen, dass hochwertige Rezyklate auch bei weniger günstigen Allokationsregeln (50/50 und 50/100) noch ökologische Vorteile gegenüber der PP-Neuware haben. Diese Aussage gilt allerdings nicht für die Kaskadennutzung von Rezyklaten (sogenanntes Downcycling), da in solchen Fällen keine echte Kreislaufführung des Kunststoffs stattfindet. Die Nutzung weniger hochwertiger Rezyklate für triviale Anwendungen (z. B. Parkbänke) führt zu einer Substitution anderer Werkstoffe (z. B. Holz), für die die Ergebnisse dieser Studie wiederum nicht gelten.

---

<sup>126</sup> Kennzeichnung von LVP mit dem Recyclingcode  sowie dem Grünen Punkt.

<sup>127</sup> Vgl. Umweltbundesamt (2022b).

<sup>128</sup> Vgl. VerpackG (2019).

### Diskussion möglicher Fehlerquellen

Im Folgenden wird kurz auf mögliche Fehlerquellen in den LCA-Ergebnissen eingegangen, beginnend mit der Datengrundlage. Die Qualität der Primär- und Sekundärdaten ist im Allgemeinen sehr gut. Die ausführliche Beschreibung der Datenqualität ist dem Kapitel 3.2.5 zu entnehmen. Die modellierten Prozesse, einschließlich ihrer Input- und Outputdaten, spiegeln die industrielle Praxis wider, weshalb hier per se keine signifikanten Fehlerquellen zu finden sind. Daher folgen an dieser Stelle nähere Erläuterungen zu den einzelnen Prozessen, beginnend mit dem Eimer aus Neuware.

Im Falle des Farbeimers aus PP-Neuware ist die eigentliche Rohstoffgewinnung/Materialherstellung für fast alle betrachteten Wirkungskategorien der dominierende Prozess des bilanzierten Produktsystems. Die Materialzusammensetzung des Eimers, einschließlich seiner Masse, liegt als Primärdatensatz vor und wurde als exakter Wert angegeben (keine Wertebereiche). Die Verknüpfung der genannten Daten mit den Datenbankprozessen (z. B. der PP-Herstellung) inklusive Vorketten birgt daher keine Fehlerquelle. Der Datensatz für die PP-Herstellung wurde 2014 erstmals veröffentlicht und im November 2021 zum letzten Mal geändert.

Die Datengrundlage für die Spritzgussproduktion basiert auf exakten Werten, die von der Firma Jokey mittels Fragebogen zur Verfügung gestellt wurden. Analog zur Herstellung der Neuware-Eimer wurden auch für die Rezyklateimer Primärdaten verwendet und der Spritzgießprozess modelliert. In einem zweiten Schritt wurden diese Primärdaten mit entsprechenden Sekundärdaten aus der ecoinvent-Datenbank verknüpft.

Bei der Modellierung von Kältemitteln besteht ein gewisses Fehlerpotenzial. Hier wurde darauf verzichtet, die genaue chemische Zusammensetzung heranzuziehen. Stattdessen wurde ein vergleichbarer Datensatz aus der Datenbank – Chlordifluormethan – genutzt. Ähnlich verhält es sich mit dem verwendeten Antistatikum. Hier wurde der Datenbankeintrag für die

vergleichbare Verbindung Alkylbenzolsulfonat herangezogen. Die letzte Änderung der genannten Datensätze erfolgte im November 2021.

Die Modellierung der Verwertung ausgedienter Eimer erfolgte auf Basis empirisch fundierter Daten aus dem Jahr 2021<sup>129</sup>, die jedoch die Verwertung einer generischen Kunststoffverpackung abbilden. Im Zuge der Studie erfolgte keine Primärdatenerhebung für die Verwertung der Neuware-Eimer. Dies gilt gleichermaßen für den Rezyklateimer. Eine Abweichung der EoL-Phase der Eimer von den tatsächlich modellierten Prozessen ist daher anzunehmen.

Die Daten für die Aufbereitung und Herstellung der Sekundärrohstoffe für die Produktion der Rezyklateimer wurden der Studie Bulach et al. (2022) entnommen. Da der Rezyklateimer aus LVP-Abfällen besteht, stimmen die zugrunde gelegten Annahmen und Modelle mit der tatsächlichen Praxis überein. Für das Recycling der ausrangierten Recyclingeimer wurden die gleichen Modelle wie für die Neuware-Variante verwendet.

---

<sup>129</sup> Vgl. Bulach et al. (2022).

## **5 FAZIT UND EMPFEHLUNGEN**

### **5.1 Beurteilung der ökologischen und ökonomischen Zweckmäßigkeit der Verwendung von Kunststoffrezyklaten für die Herstellung neuer Verpackungen**

Auf Basis des Fallbeispiels – einer technisch anspruchsvollen Anwendung für Rezyklate (Eimer für Wandfarbe) – weisen die Ergebnisse dieser Studie einen klaren ökologischen Vorteil von PP-Rezyklat gegenüber der Nutzung des primären Kunststoffes aus. Die ökobilanzielle Vergleichsrechnung zeigt, dass das Treibhausgaspotenzial des Rezyklatprodukts um 25 % geringer ausfällt als im Falle des Eimers aus PP-Neuware. Bei den Wirkungskategorien KEA und KRA liegen die Ergebnisse für den Rezyklateimer sogar im negativen Bereich, d. h., es werden Gutschriften für die energetische Verwertung in der Entsorgungsphase angerechnet. Auch beim Wasserverbrauch über den gesamten Lebenszyklus schneidet die Produktvariante aus Rezyklat deutlich besser ab als die Variante aus Primärkunststoff. Wie die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse zeigen, hat diese Aussage ebenfalls dann Bestand, wenn eine gleichmäßige Lastenverteilung zwischen erstem und zweitem Lebenszyklus betrachtet wird. Demnach ist die Nutzung von Kunststoffrezyklaten aus ökologischer Perspektive in jedem Fall vorteilhaft.

Auf Grundlage dieser Erkenntnis können Unternehmen die Verwendung von Rezyklaten als Beitrag zur Reduktion der eigenen Ressourceninanspruchnahme und zum Klimaschutz deuten. Die Verwendung ermöglicht einen signifikanten Beitrag zur Reduktion des Treibhausgaspotenzials von Verpackungen. Dies kommt dann zum Tragen, wenn die rezyklatbasierte Verpackung funktionell gleichwertig zu solchen aus Neuware ist. In dem Fall können Verpackungen aus Primär-PP substituiert werden, sodass die Inanspruchnahme fossiler Rohstoffe wie Erdöl verringert wird. In Zukunft kann noch mit weiteren Verbesserungen des Beitrags der Rezyklate zur Umweltentlastung gerechnet werden, nämlich sobald die Recyclingquoten für Kunststoffe europaweit auf 50 Ma.-% bis 2025 ansteigen. Dadurch

vergrößert sich das Angebot an hochwertigen Rezyklaten, die sich auch für anspruchsvolle Zielanwendungen eignen.

Aus ökonomischer Sicht ist der Rezyklateinsatz der Nutzung von Neuware bisher noch nicht ebenbürtig. Das hier betrachtete Fallbeispiel zeigt jedoch, dass es durchaus möglich ist, Produkte aus Rezyklaten wirtschaftlicher herzustellen als unter Verwendung von Primärkunststoffen. Allerdings verdeutlicht die Preisentwicklung für das Jahr 2022 auch, dass dieses Geschäftsmodell bei steigenden Preisen für Recycling-Kunststoffpellets kein „Selbstläufer“ ist. Dies lag insbesondere am niedrigen Marktpreis für Neuware, der sich aus den vormals geringen Ölpreisen ergab. Dieser Wettbewerbsnachteil der Rezyklate hat sich infolge der Preisentwicklungen für Rohöl seit dem Jahr 2022 zwar relativiert – doch auch die Marktpreise für hochwertige Rezyklate sind natürlich von steigenden Energiekosten betroffen.

Neben den allgemeinen ökonomischen Rahmenbedingungen spielen mögliche Folgen legislativer Eingriffe eine Rolle. Unter den veränderten regulatorischen Rahmenbedingungen wie dem EU Circular Economy Action Plan und dem deutschen Kreislaufwirtschaftsgesetz (vgl. Kapitel 2.4) ist jedoch in Zukunft mit starken ökonomischen Anreizen sowohl für das Kunststoffrecycling als auch für den Rezyklateinsatz, zu rechnen. Die steigende Nachfrage nach rezyklatbasierten Endprodukten zeigt bereits, dass Kunststoffanwendende zunehmend bereit sind, höhere Preise für diese Produkte zu akzeptieren. Einer der Gründe dafür ist die Monetarisierung des niedrigeren Carbon Footprints von Rezyklaten. Viele Unternehmen sehen in der Verwendung von rezyklatbasierten Produkten eine Möglichkeit, ihre klimapolitischen Verpflichtungen zu erfüllen, die in einigen Fällen über die gesetzlich festgelegten Ziele für die Verwendung von Rezyklaten hinausgehen.

Weitere regulatorische Anreize in Richtung Verwendung von Kunststoffrezyklaten sind denkbar und zukünftig auch zu erwarten. So wird beispielsweise die Einführung einer Kunststoffabgabe in Deutschland aktuell

vorangetrieben (vgl. Kapitel 2.4.4), um die typische Preiskopplung zwischen Primär- und Sekundärrohstoffen zu lösen.<sup>130</sup> Deren Einnahmen könnten dafür verwendet werden, den Einsatz von Sekundärkunststoff zu fördern bzw. zu bezuschussen. Dieses ökonomische Politikinstrument hat das Potenzial, eine Steuerungswirkung auf den Märkten für Primär- und Sekundärrohstoffe zu entfalten und einen tatsächlichen Anreiz in Richtung Zirkularität zu setzen. Für kunststoffverarbeitende Unternehmen würde sich dadurch die Nutzung von Rezyklaten aus ökonomischer Sicht deutlich rentabler gestalten.

## **5.2 Empfehlungen für KMU zur Verbesserung der praktischen Anwendbarkeit von Rezyklaten**

Kunststoffverarbeitende Unternehmen wie z. B. Spritzgussfirmen, die den Einsatz von Rezyklaten erwägen, können auf eine Vielfalt bestehender Erfahrungen zurückgreifen. Als ersten Schritt empfiehlt sich eine interne Bestandsaufnahme, um zu evaluieren, welche der Produkte im Sortiment eines Unternehmens für den Rezyklateinsatz aus technischer Sicht in Frage kommen. Dabei richtet sich der Blick zunächst auf Produkte ohne Lebensmittelkontakt, da letztere in Deutschland derzeit noch nicht für den Rezyklateinsatz erlaubt sind (eine Ausnahme stellt hierbei PET dar). Umverpackungen oder Außenkomponenten von Verkaufsverpackungen (z. B. Henkel) kommen hingegen durchaus in Frage. Einen Leitfaden für diesen Prüfschritt bietet das Forum Rezyklat zum kostenfreien Download.<sup>131</sup>

Vor der Entscheidung für den Einsatz von Rezyklaten sollte zudem geprüft werden, für welche Produkte die Substitution von Neuware ökologisch und ökonomisch sinnvoll ist. Insbesondere gilt es daher, zunächst Optionen zur Abfallvermeidung zu identifizieren, beispielsweise durch Gewichtsoptimierung, das Weglassen überflüssiger Bestandteile oder die (Um-)Orientierung hin zu Mehrwegsystemen. Einen Leitfaden für

---

<sup>130</sup> Stand: Mai 2022.

<sup>131</sup> Vgl. Forum Rezyklat (2022).

Ökodesign für Verpackungen stellt die IK Kunststoff kostenfrei zur Verfügung.<sup>132</sup> Dieser Service umfasst ebenso eine Reihe von Praxisbeispielen für die Anwendung der Ökodesign-Checklisten und -Tools.

Auch bei der Anwendung von Rezyklaten gilt es, die gesetzlichen Anforderungen zur Recyclingfähigkeit der gefertigten Verpackungen von vornherein mitzudenken. Damit der hochwertige Rezyklateinsatz mit dem auf EU-Ebene angestrebten Konzept einer Circular Economy (vgl. Kapitel 2.4.3) anschlussfähig wird, sollten gleichfalls Rezyklatprodukte in Zukunft recyclingfähig sein (oder das Recycling zumindest nicht stören). Daher ist das Design für Recycling nicht nur für Produkte aus Neuware, sondern auch für solche aus rezyklierten Kunststoffen von Relevanz. Das frei verfügbare Online-Tool „RecyClass“ sowie praxisgerecht aufbereitete Guidelines bieten vielfältige Hilfestellungen für Unternehmen, die Kompatibilität ihrer Verpackungsprodukte mit dem Kunststoffrecycling zu evaluieren.<sup>133</sup> Eine weitere nützliche Informationsquelle ist der Leitfaden zur Beurteilung der Recyclingfähigkeit von Eurofins.<sup>134</sup>

Aus der Perspektive der ökologischen und ökonomischen Effektivität sollten verfügbare Rezyklatqualitäten vorrangig in solchen Anwendungsgebieten eingesetzt werden, in denen eine Substitution von Primärkunststoff hohe Einspareffekte bewirkt. Eine Nutzung von Rezyklaten in Produkten sollte nicht zu einem wesentlichen Mehrverbrauch von Kunststoffen führen, d. h., kein Produkt sollte nur aus Marketinggründen hergestellt und keine minderwertigen Rezyklate sollten genutzt werden, die zu einer wesentlich kürzeren Haltbarkeit der daraus gefertigten Produkte führen. Der in dieser Studie gezeigte Beitrag zur Reduktion des Carbon Footprints von Verpackungen lässt sich nur dann realisieren, wenn der Rezyklateinsatz zu tatsächlichen Einsparungen von Neuware führt.

---

<sup>132</sup> Vgl. IK e.V. (2022).

<sup>133</sup> Vgl. Plastics Recyclers Europe (2022).

<sup>134</sup> Vgl. Eurofins (2020).

Ein weiterer Schritt beinhaltet die Prüfung der technischen und funktionalen Parameter von Recyclingkunststoffen, die im Fertigungsprozess und produktseitig erfüllt sein müssen. Fachleute mit langjähriger Expertise im Hinblick auf den Einsatz von Rezyklaten im Spritzguss empfehlen hier, sich mit den Zuliefernden auf den konkreten Anwendungsfall abzustimmen. Gerade bei der erstmaligen Planung von hochwertigen Zielanwendungen ist es daher wichtig, das Know-how der Recyclingfachleute über die Einsatzmöglichkeiten und Verarbeitungseigenschaften der Rezyklate zu nutzen. Aus dieser Perspektive heraus kann die Entwicklung stabiler Partnerschaften zu Zuliefernden einer langfristigen Geschäftsplanung für die Rezyklatverwendung förderlich sein.

Vor dem Hintergrund des derzeit starken Nachfrageanstiegs kann es jedoch vorübergehend zu Versorgungsengpässen bei hochwertigen Rezyklaten kommen. Hieraus können für Neukundinnen und -kunden Probleme erwachsen, die den Aufbau langfristiger Beziehungen zu Zuliefernden erschweren und den Rückgriff auf wechselnde Zulieferunternehmen erforderlich machen. Um die daraus resultierenden Schwankungen in der Rezyklatqualität abzufedern, empfiehlt es sich, zunächst Rezyklatmischungen mit 50 % oder 25 % Neuware einzusetzen (sogenannte RAL-Mischungen), da so die Verarbeitungseigenschaften konstant gehalten werden können.

Natürlich sollte die Verwendung von Rezyklaten auch mit der bestehenden Kundschaft abgestimmt werden. Hier gilt es, die Endanwenderinnen und -anwender von Kunststoffprodukten über die Eigenschaften von rezyklatbasierten Produkten zu informieren und eventuell noch vorhandene Vorurteile gegenüber Rezyklaten abzubauen. In diesem Zusammenhang kann ein Verweis auf Best-Practice-Beispiele für hochwertige Produkte aus Rezyklaten, wie sie von der Vergabestelle des RAL-Gütezeichens GZ 720 zusammengestellt wurden, hilfreich sein.<sup>135</sup>

---

<sup>135</sup> Vgl. Gütegemeinschaft Rezyklate aus haushaltsnahen Wertstoffsammlungen e.V. (2022).



Langfristig ist es jedoch sinnvoll, Normen für Kunststoffrezyklate einzuführen, um die Transaktionskosten der Rezyklatverwendung zu senken. Zweifelsohne ist eine fallweise Kommunikation zwischen kunststoffverarbeitenden Unternehmen und Recyclingfirmen in der Einführungsphase sinnvoll. Standardisierte Rezyklatqualitäten können jedoch dazu beitragen, die Kosten in einer Kreislaufwirtschaft zu senken, da eine fallweise Kommunikation über die Rezyklateigenschaften in der Massenfertigung nicht erforderlich ist. In diesem Zusammenhang ist zu empfehlen, dass die kunststoffverarbeitende Industrie mit den Recyclingunternehmen zusammenarbeitet, um sich auf verbindliche Qualitätsklassen für Rezyklate zu verständigen und einheitliche Qualitätsparameter innerhalb definierter Toleranzbereiche festzulegen.

Die in Kapitel 2.1.1 erwähnte Norm DIN SPEC 91446<sup>136</sup> ist ein erster Schritt in diese Richtung. Die hier formulierten Vorschriften beziehen sich jedoch nur auf die Mitteilung von Rezyklateigenschaften, nicht aber auf Rezyklatqualitäten. Der von R-Cycle 2022 vorgestellte digitale Produktpass für Kunststoffprodukte operationalisiert wiederum den Austausch von Daten entlang des Lebenszyklus von Kunststoffprodukten auf der Basis eines offenen digitalen Standardformats.<sup>137</sup>

---

<sup>136</sup> Vgl. DIN SPEC 91446:2021.

<sup>137</sup> Vgl. Kunststoffe.de (2022).

## LITERATURVERZEICHNIS

**Achenbach, H. (2022):** Identifikation von Rezyklateinsatzpotenzialen durch Analyse allgemeiner Normen und herstelleraufspezifischer Anforderungen in verschiedenen Anwendungsbereichen [abgerufen am: 19.07.2023], verfügbar unter: <https://www.skz.de/forschung/projekt/rezy-spezi>

**Bendix, P.; Berg, H.; Sebestyen, J.; Ritthoff, M.; Perschel, L.; Eckert, D.; Kocina, R. und Achenbach, H. (2021):** Förderung einer hochwertigen Verwertung von Kunststoffen aus Abbruchabfällen sowie der Stärkung des Rezyklateinsatzes in Bauprodukten im Sinne der europäischen Kunststoffstrategie. UBA-Texte 151/2021. Dessau-Roßlau [abgerufen am: 11.07.2023], verfügbar unter: [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2021-11-23\\_texte\\_151-2021\\_rebaupro\\_0.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2021-11-23_texte_151-2021_rebaupro_0.pdf)

**BMK (o. D.):** EU-Kunststoffstrategie [abgerufen am: 12.05.2022], verfügbar unter: [https://www.bmk.gv.at/themen/klima\\_umwelt/kunststoffe/eu-rop\\_kunststoffstrategie.html](https://www.bmk.gv.at/themen/klima_umwelt/kunststoffe/eu-rop_kunststoffstrategie.html)

**BMUV (2020):** Eckpunkte der Novellierung des Kreislaufwirtschaftsgesetzes (KrWG) [abgerufen am: 01.05.2022], verfügbar unter: <https://www.bmuv.de/themen/wasser-ressourcen-abfall/kreislaufwirtschaft/abfallpolitik/uebersicht-kreislaufwirtschaftsgesetz/eckpunkte-der-novellierung-des-kreislaufwirtschaftsgesetzes-krwg>

**BMUV (2021):** Kreislaufwirtschaftsgesetz. Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen [abgerufen am: 01.05.2022], verfügbar unter: <https://www.bmuv.de/gesetz/kreislaufwirtschaftsgesetz>

**Bulach, W.; Dehoust, G.; Mayer, F. und Möck, A. (2022):** Ökobilanz zu den Leistungen der dualen Systeme im Bereich des Verpackungsrecyclings. Öko-Institut e.V. [abgerufen am: 19.07.2023], verfügbar unter: [https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Duale\\_Systeme\\_Oekobilanz\\_Endbericht.pdf](https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Duale_Systeme_Oekobilanz_Endbericht.pdf)

**Bvse (o. D.):** Verpackungsgesetz [abgerufen am: 01.05.2022], verfügbar unter: <https://www.bvse.de/sachverstand-bvse-recycling/alles-was-recht-ist/wichtige-gesetze/verpackungsgesetz/778-verpackungsgesetz.html>

**Cirplus GmbH (o. D.):** Recycelte Kunststoffe online beschaffen [abgerufen am: 17.07.2023], verfügbar unter: <https://www.cirplus.com>

**Dehoust, G.; Möck, A.; Merz, C. und Gebhardt, P. (2016):** Umweltpotenziale der getrennten Erfassung und des Recyclings von Wertstoffen im Dualen System. Bilanz der Umweltwirkungen. Öko-Institut e.V.

**DiLink (2020):** Di-Link Policy Brief I: Stärkung des Kunststoffrecyclings – Lessons learned aus Recherche und Unternehmensbefragung [abgerufen am: 19.07.2023], verfügbar unter: <https://www.di-link.de/veroeffentlichungen-1/>

**DIN EN ISO 14040:2006:** Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen, Deutsche Norm, Beuth Verlag, Berlin.

**DIN EN ISO 14044:2018-05:** Umweltmanagement – Ökobilanz – Anforderungen und Anleitungen, Deutsche Norm, Beuth Verlag, Berlin.

**DIN SPEC 91446:2021:** Klassifizierung von Kunststoff-Rezyklaten durch Datenqualitätslevel für die Verwendung und den (internetbasierten) Handel, Beuth Verlag, Berlin.

**DR Deutsche Recycling Service GmbH (o. D.):** EU-Verpackungsrichtlinie: Was gibt es zu beachten [abgerufen am: 01.05.2022], verfügbar unter: <https://deutsche-recycling.de/verpackungsgesetz-beratung/>

**Duales System Deutschland GmbH (2017):** DSD: Downloads – Spezifikationen, Stand 2014/Stand 2017 [abgerufen am: 01.04.2022], verfügbar unter: <https://www.gruenerpunkt.de/de/download.html>

**Ecoinvent (2022):** Swiss Centre for Life Cycle Inventories: ecoinvent 3.8, Ökobilanzdatenbank. Zürich 2022.

**Endres, H.-J. und Shamsuyeva, M. (2020):** Warum die Kreislaufwirtschaft bessere Standards braucht [abgerufen am: 01.05.2022], verfügbar unter: <https://www.plastverarbeiter.de/verarbeitungsverfahren/kunststoffrecycling/kreislaufwirtschaft-braucht-bessere-standards-857.html>

**Engel Austria (o. D.):** Digitale Lösungen im Spritzguss, [abgerufen am: 01.11.2022] verfügbar unter: <https://www.engelglobal.com/de/ch/digitale-loesungen>

**Eurofins (2020):** Leitfaden zur Beurteilung der Recyclingfähigkeit [abgerufen am: 19.07.2023], verfügbar unter: [https://www.eurofins.com/media/12154836/div-079-pm\\_de\\_leitfaden\\_zur\\_beurteilung\\_der\\_recyclingfaehigkeit\\_eurofins\\_version\\_20\\_stand\\_september\\_2020\\_final.pdf](https://www.eurofins.com/media/12154836/div-079-pm_de_leitfaden_zur_beurteilung_der_recyclingfaehigkeit_eurofins_version_20_stand_september_2020_final.pdf)

**EU-Recycling (2020):** Digitales Tool zur Vermarktung von Kunststoff-zyklen geht in die zweite Runde [abgerufen am: 01.05.2022], verfügbar unter: <https://eu-recycling.com/Archive/26255>

**Europäische Kommission (2018):** Eine europäische Strategie für Kunststoff in der Kreislaufwirtschaft COM(2018) 28 final [abgerufen am: 01.04.2022], verfügbar unter: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1516265440535&uri=COM:2018:28:FIN>

**Europäische Kommission (2020):** Ein neuer Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft, COM(2020) 98 final [abgerufen am: 01.04.2022], verfügbar unter: [https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:9903b325-6388-11ea-b735-01aa75ed71a1.0016.02/DOC\\_1&format=PDF](https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:9903b325-6388-11ea-b735-01aa75ed71a1.0016.02/DOC_1&format=PDF)

**Europäische Kommission (2021):** Kunststoff-Eigenmittel [abgerufen am: 01.05.2022], verfügbar unter: [https://ec.europa.eu/info/strategy/eu-budget/long-term-eu-budget/2021-2027/revenue/own-resources/plastics-own-resource\\_de](https://ec.europa.eu/info/strategy/eu-budget/long-term-eu-budget/2021-2027/revenue/own-resources/plastics-own-resource_de)

**EU-VerpackRL (2018):** Richtlinie über Verpackungen und Verpackungsabfälle [abgerufen am: 01.05.2022], verfügbar unter: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018L0852&from=DE>

**EUWID (2021):** VKU begrüßt geplante Umlegung der Plastiksteuer auf Hersteller [abgerufen am: 01.05.2022], verfügbar unter: <https://www.euwid-recycling.de/news/wirtschaft/vku-begruesst-geplante-umlegung-der-plastiksteuer-auf-hersteller/>

**Forum Rezyklat (2022):** Leitfaden Rezyklat [abgerufen am: 19.07.2023], verfügbar unter: [https://www.forum-rezyklat.de/fileadmin/user\\_upload/20220506\\_\\_FR\\_Leitfaden\\_Rezyklat\\_V.1.1.pdf](https://www.forum-rezyklat.de/fileadmin/user_upload/20220506__FR_Leitfaden_Rezyklat_V.1.1.pdf)

**Gütegemeinschaft Rezyklate aus haushaltsnahen Wertstoffsammlungen e.V. (2022):** Best Practice – Unsere Anwendungsbeispiel [sic!] [abgerufen am: 19.07.2023], verfügbar unter: <https://ral-rezyklat.de/best-practice/>

**GVM (2021):** Recycling-Bilanz für Verpackungen, Berichtsjahr 2020, Zusammenfassung der Ergebnisse, Gesellschaft für Verpackungsmarktforschung, Mainz [abgerufen am: 01.04.2022], verfügbar unter: [https://gvmonline.de/files/recycling/Recycling\\_2020\\_Zusammenfassung\\_Ergebnisse.pdf](https://gvmonline.de/files/recycling/Recycling_2020_Zusammenfassung_Ergebnisse.pdf)

**Hesselmann Service GmbH (2022):** Die Plastik-Steuer 2022 [abgerufen am: 01.05.2022], verfügbar unter: <https://www.verpackungsge-setz.com/themen/die-plastiksteuer-2022/>

**Hunkeler, D.; Lichtenvort K.; Rebitzer, G. (Hg)(2008):** Environmental Life Cycle Costing, SETAC Publications, Boca Raton/London/New York.

**IHK (o. D.):** EU Green Deal: EU-Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft [abgerufen am: 01.05.2022], verfügbar unter: <https://www.karlsruhe.ihk.de/fachthemen/umwelt/abfall/aktuelle-informationen/eu-green-deal-eu-aktionsplan-fuer-die-kreislaufwirtschaft-4884372>

**IHK (2020a):** Rat beschließt EU-Plastikabgabe als Teil des neuen EU-Haushalts [abgerufen am: 01.05.2022], verfügbar unter: <https://www.karlsruhe.ihk.de/fachthemen/umwelt/abfall/aktuelle-informationen/rat-beschliesst-eu-plastikabgabe-als-teil-des-neuen-eu-haushalts-4853486>

**IHK (2020b):** Neues Kreislaufwirtschaftsgesetz in Kraft getreten [abgerufen am: 01.05.2022], verfügbar unter: <https://www.karlsruhe.ihk.de/fachthemen/umwelt/abfall/neueskreislaufwirtschaftsgesetz/neues-kreislaufwirtschaftsgesetz-in-kraft-getreten-4933664>

**IK e.V. und AGVU (2020):** Gesetzliche Mindestquoten für Rezyklate in Kunststoffverpackungen? Diskussionspapier zur aktuellen Debatte [abgerufen am 15.08.2023], verfügbar unter: <https://www.agvu.de/de/gesetzliche-mindestquoten-fuer-rezyklate-in-kunststoffverpackungen-2515/>

**IK Industrievereinigung Kunststoffverpackungen e.V. (2022):** Kreislaufwirtschaft: Einsatz von recycelten Kunststoffen in Verpackungen [abgerufen am: 19.07.2023], verfügbar unter: <https://kunststoffverpackungen.de/wp-content/uploads/2022/05/IK-Positionspapier-Kreislaufwirtschaft-Einsatz-von-recycelten-Kunststoffen-in-Verpackungen.pdf>

**Industrystock (o. D.):** Rezyklat [abgerufen am: 12.10.2022], verfügbar unter: <https://www.industrystock.de/de/unternehmen/Umwelttechnik/Recyclingindustrie/Kunststoffrecycling/Recyclat>

**Institut Cyclos HTP GmbH (2022):** E-Mail vom 11. August 2022.

**IPCC (2021):** Climate Change 2021: The Physical Science Basis, Cambridge University Press, United Kingdom and New York, NY, USA [abgerufen am: 19.07.2023], verfügbar unter: <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-working-group-i/>

**ISCC (2022):** International Sustainability and Carbon Certification (2022) ISCC About Objectives [abgerufen am: 19.07.2023], verfügbar unter: <https://www.iscc-system.org/about/>

**ISO 15663-2:2001:** Petroleum and natural gas industries – Life-cycle costing – Part 2: Guidance on application of methodology and calculation methods.

**Jetzke, T. und Richter, S. (2020):** Hochwertiges Recycling für eine Kunststoffkreislaufwirtschaft. Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB) [abgerufen am: 01.04.2022], verfügbar unter: <https://publikationen.bibliothek.kit.edu/1000133939>

**Jokey SE (2022):** JETO 110+ Datenblatt [abgerufen am: 17.07.2023], verfügbar unter: [https://www.jokey.com/fileadmin/user\\_upload/Produktkatalog/Produkte/Anhang/JETOPLUS110\\_EN.pdf](https://www.jokey.com/fileadmin/user_upload/Produktkatalog/Produkte/Anhang/JETOPLUS110_EN.pdf)

**Keyence (2023):** Inline-/Offline-Messung [abgerufen am: 14.10.2022], verfügbar unter: [https://www.keyence.de/ss/products/measure/measurement\\_library/basic/in\\_offline/#:~:text=Die%20Inline%20Messung%20kann%20auch,der%20Linie%20\(offline\)%20erfolgen](https://www.keyence.de/ss/products/measure/measurement_library/basic/in_offline/#:~:text=Die%20Inline%20Messung%20kann%20auch,der%20Linie%20(offline)%20erfolgen)

**KI Hub Kunststoffverpackungen (2023):** KI-HUB Kunststoffverpackungen – nachhaltige Kreislaufwirtschaft durch Künstliche Intelligenz. [abgerufen am 11.07.2023], online verfügbar unter: <https://ki-hub-kunststoffverpackungen.de/>

**Knappe, F.; Reinhardt, J.; Kauertz, B; Oetjen-Dehne, R.; Buschow, N.; Ritthoff, M.; Wilts, H. und Lehmann, M. (2021):** Technische Potenzialanalyse zur Steigerung des Kunststoffrecyclings und des Rezyklateinsatzes, Umweltbundesamt (Hrsg.) [abgerufen am: 19.07.2023], verfügbar unter: [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2021-12-10\\_texte\\_92-2021\\_potenzialanalyse-kunststoffrecycling.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2021-12-10_texte_92-2021_potenzialanalyse-kunststoffrecycling.pdf)

**Kunststoffe.de (2022):** Daten sind der Schlüssel für mehr Effizienz [abgerufen am: 19.07.2023], verfügbar unter: <https://www.kunststoffe.de/a/news/daten-sind-der-schluessel-fuer-mehr-effi-3064654>

**Lindner, C.; Schmitt, J. und Hein, J. (2020):** Stoffstrombild Kunststoffe in Deutschland 2019 (Kurzfassung). Conversio Market & Strategy GmbH, Mainaschaff [abgerufen am: 01.04.2022], verfügbar unter: [https://www.bkv-gmbh.de/files/bkv-neu/studien/Kurzfassung\\_Stoffstrombild\\_2019.pdf](https://www.bkv-gmbh.de/files/bkv-neu/studien/Kurzfassung_Stoffstrombild_2019.pdf)

**Lindner, C.; Schmitt, J., Fischer, E. und Hein, J. (2022):** Stoffstrombild Kunststoffe in Deutschland 2021 (Kurzfassung). Conversio Market & Strategy GmbH, Mainaschaff [abgerufen am: 01.11.2022], verfügbar unter: [https://www.bvse.de/dateien2020/2-PDF/01-Nachrichten/03-Kunststoff/2022/Kurzfassung\\_Stoffstrombild\\_2021\\_13102022\\_1\\_.pdf](https://www.bvse.de/dateien2020/2-PDF/01-Nachrichten/03-Kunststoff/2022/Kurzfassung_Stoffstrombild_2021_13102022_1_.pdf)

**Maschinenbau-Wissen (2009):** Prozessablauf beim Spritzgießen [abgerufen am: 01.10.2022], verfügbar unter: <https://www.maschinenbau-wissen.de/skript3/werkstofftechnik/kunststoffe/389-spritzgiessen-prozess>

**Mederake, L.; Hinzmann, M. und Langsdorf, S. (2020):** Hintergrundpapier: Plastikpolitik in Deutschland und der EU. Aktuelle Gesetze und Initiative, Ecologic Institut [abgerufen am: 01.05.2022], verfügbar unter: [https://www.ecologic.eu/sites/default/files/publication/2021/20-08-04\\_Hintergrundpapier\\_Plastikpolitik-final.pdf](https://www.ecologic.eu/sites/default/files/publication/2021/20-08-04_Hintergrundpapier_Plastikpolitik-final.pdf)

**Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie und Mobilität Rheinland-Pfalz (2022):** Eder: „Ein Quantensprung beim Kunststoffrecycling“, Pressemitteilung vom 23.02.2022 [abgerufen am: 17.07.2023], verfügbar unter: <https://mkuem.rlp.de/service/pressemitteilungen/detail/eder-ein-quantensprung-beim-kunststoffrecycling>

**NABU (2020):** Der Aktionsplan Kreislaufwirtschaft der EU-Kommission [abgerufen am: 01.05.2022], verfügbar unter: [https://www.nabu.de/imperia/md/content/nabude/konsumressourcenmuell/200416-nabu\\_aktionsplan\\_krw.pdf](https://www.nabu.de/imperia/md/content/nabude/konsumressourcenmuell/200416-nabu_aktionsplan_krw.pdf)

**PlasticBOND (2022):** Nachhaltige Optimierung von Kunststoffverpackungen - Von Linearwirtschaft zu kreislauffähiger Wertschöpfung durch detailliertes Materialwissen und digitalen Services [abgerufen am 11.07.2023], online verfügbar unter: <https://plasticbond.de>

**Plastics Recyclers Europe (2018):** European Certification of Plastics Recycling [abgerufen am: 17.07.2023], verfügbar unter: <https://www.eu-certplast.eu>

**Plastics Recyclers Europe (2022):** RecyClass Online Tool [abgerufen am: 17.07.2023], verfügbar unter: <https://recyclclass.eu/recyclability/online-tool/>

**Plastship GmbH (o. D.):** Ihr Industrie-Netzwerk für recycelte Kunststoffe und Kunststoffrecycling [abgerufen am: 17.07.2023], verfügbar unter: <https://www.plastship.com/>

**RAL gGmbH (2019):** BLAUER ENGEL DE-UZ 30a - Vergabekriterien Produkte aus Recyclingkunststoffen, Ausgabe Januar 2019, Version 8.



**RAL gGmbH (2020):** RAL-GZ 720, % Recycling Kunststoff [abgerufen am: 01.05.2022], verfügbar unter: [https://www.ral-guetezeichen.de/gz-einzelansicht/?gz=gz\\_720](https://www.ral-guetezeichen.de/gz-einzelansicht/?gz=gz_720) sowie <https://ral-rezyklat.de/unsere-guetezeichen/>

**R-Cycle (2023):** R-Cycle [abgerufen am 11.07.2023], online verfügbar unter: <https://www.r-cycle.org/>

**Recycling Service GmbH (o. D.):** Recyclingquote Deutschland – Vergleich mit anderen europäischen Ländern [abgerufen am: 01.05.2022], verfügbar unter: <https://deutsche-recycling.de/blog/recyclingquote-deutschland-vergleich>

**Scheuermann, A. (2021):** Großes Potenzial für Rezyklate in Kunststoffverpackungen [abgerufen am: 01.04.2022], verfügbar unter: <https://www.chemietechnik.de/markt/grosses-potenzial-fuer-rezyklate-in-kunststoffverpackungen-123.html>

**Schmidt, I. (2022):** Industrievereinigung Kunststoffverpackungen e. V., Experteninterview.

**Schmitz, M.; Dengel, G. und Karsubke, H. (2022):** Jokey SE, persönliches Interview vom 14.04.2022.

**Secondtrade GmbH (o. D.):** Ihr digitaler Marktplatz für Sekundär-Rohstoffe [abgerufen am: 17.07.2023], verfügbar unter: <https://www.secondtrade.com>

**SKZ – Das Kunststoff-Zentrum (2021a):** Kunststoffrezyklate: SKZ und Plastship starten gemeinsames Projekt [abgerufen am: 19.07.2023] verfügbar unter: <https://recyclingportal.eu/Archive/68677>

**SKZ – Das Kunststoff-Zentrum (2021b):** SCO2RE. CO<sub>2</sub>-Bilanzierung von technischen Kunststoffrezyklaten [abgerufen am: 13.10.2022], verfügbar unter: <https://www.skz.de/forschung/kreislaufwirtschaft/sco2re-co2-bilanzierung-von-technischen-kunststoffrezyklaten>

**SKZ – Das Kunststoff-Zentrum (2021c):** Neues Inline-Messsystem vom SKZ erkennt Fremdpartikel in Kunststoffschmelzen [abgerufen am: 14.10.2022], verfügbar unter: <https://www.skz.de/presse/neues-inline-messsystem-vom-skz-erkennt-fremdpartikel-in-kunststoffschmelzen>

**SKZ – Das Kunststoff-Zentrum (2022/2023):** Identifikation der Rezyklateinsatzpotenziale durch Analyse allgemeiner Normen und herstellerspezifischer Anforderungen in verschiedenen Anwendungsbereichen - Rezy-Spezi (2022/2023), Förderkennzeichen 37823/01-3, gefördert durch Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) [abgerufen am: 01.05.2022], verfügbar unter: <https://www.skz.de/forschung/projekt/rezy-spezi>

**Turuc, A. (2021):** Perspektiven und Hemmnisse des Recyclings von Kunststoffverpackungen aus dem Leichtverpackungsabfall, Hochschule Rhein Main, Wiesbaden Rüsselsheim.

**Umweltbundesamt (2018):** EU-Plastikstrategie: Guter Ansatz, aber zu unkonkret [abgerufen am: 01.05.2022], verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/eu-plastikstrategie-guter-ansatz-aber-zu-unkonkret>

**Umweltbundesamt (2019):** TEXTE 124/2020 Umweltzeichen Blauer Engel für Produkte aus Recycling-Kunststoffen Hintergrundbericht zur Überarbeitung der Vergabekriterien DE-UZ 30a.

**Umweltbundesamt (2021):** TEXTE 11/2021 Ermittlung der Praxis der Sortierung und Verwertung von Verpackungen im Sinne des § 21 VerpackG [abgerufen am: 15.08.2023], verfügbar unter: [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/5750/publikationen/2021-01-22\\_texte\\_11-2020\\_oekologische\\_beteiligungsentgelte.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/5750/publikationen/2021-01-22_texte_11-2020_oekologische_beteiligungsentgelte.pdf)

**Umweltbundesamt (2022a):** Abfallrecht [abgerufen am: 01.05.2022], verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/abfall-ressourcen/abfallwirtschaft/abfallrecht>

**Umweltbundesamt (2022b):** Verpackungsabfälle [abgerufen am: 01.10.2022], verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/ressourcen-abfall/verwertung-entsorgung-ausgewaehelter-abfallarten/verpackungsabfaelle#verpackungen-uberall>

**VDI 4800 Blatt 2:2018-03:** Ressourceneffizienz – Bewertung des Rohstoffaufwands. VDI-Gesellschaft Energie und Umwelt (GEU), Verein Deutscher Ingenieure e.V., Beuth Verlag GmbH, Düsseldorf.

**VDI Verein Deutscher Ingenieure e.V. (2021):** Circular Economy für Kunststoffe neu denken [abgerufen am: 19.07.2023], verfügbar unter: [https://www.vdi.de/fileadmin/pages/mein\\_vdi/redakteure/publikationen/VDI-Green-Paper-Circular-Economy-fuer-Kunststoffe-neu-denken.pdf](https://www.vdi.de/fileadmin/pages/mein_vdi/redakteure/publikationen/VDI-Green-Paper-Circular-Economy-fuer-Kunststoffe-neu-denken.pdf)

**VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH (2019):** Ökologische und ökonomische Bewertung des Ressourcenaufwands – Additive Fertigungsverfahren in der industriellen Produktion, Studie, Berlin [abgerufen am: 18.07.2023], verfügbar unter: <https://www.ressource-deutschland.de/service/publikationen/detailseite/studie-additive-fertigungsverfahren/>

**VDI Zentrum Ressourceneffizienz (2022):** Kreislaufwirtschaft. Ziele einer Kreislaufwirtschaft [abgerufen am: 19.07.2023], verfügbar unter: <https://www.ressource-deutschland.de/themen/kreislaufwirtschaft/>

**VDI Zentrum Ressourceneffizienz (2023):** Ressourceneffizienz durch innovative Recyclingtechnologien und -verfahren, Kurzanalyse Nr. 33, Berlin [abgerufen am: 18.07.2023], verfügbar unter: <https://www.ressource-deutschland.de/service/publikationen/detailseite/kurzanalyse-nr-33-ressourceneffizienz-durch-innovative-recyclingtechnologien-und-verfahren/>

**VerpackG (2019):** Gesetz über das Inverkehrbringen, die Rücknahme und die hochwertige Verwertung von Verpackungen [abgerufen am: 01.05.2022], verfügbar unter: <https://www.gesetze-im-internet.de/verpackg/>

**Werner. J. (2021):** Intelligente Rezyklate – Durch KI den Rezyklateinsatz erhöhen. Kunststoff-Zentrum SKZ [abgerufen am: 19.07.2023], verfügbar unter: <https://www.skz.de/presse/intelligente-rezyklate-durch-ki-den-rezyklateinsatz-erhoehen>



VDI Zentrum Ressourceneffizienz (VDI ZRE)  
Bülöwstraße 78  
10783 Berlin  
Tel. +49 30-2759506-0  
zre-info@vdi.de  
[www.ressource-deutschland.de](http://www.ressource-deutschland.de)

