

TEXTE

92/2021

Abschlussbericht

Technische Potenzialanalyse zur Steigerung des Kunststoffrecyclings und des Rezyklateinsatzes

von:

Florian Knappe, Joachim Reinhardt, Benedikt Kauertz
ifeu - Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH,
Heidelberg

Rüdiger Oetjen-Dehne, Nadine Buschow
Oetjen-Dehne & Partner Umwelt- und Energie-Consult GmbH, Berlin

Michael Ritthoff, Dr. Henning Wilts
Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH, Wuppertal

Dr.-Ing. Martina Lehmann
MAKSC GmbH Magdeburger Kunststoff-Service Center, Barleben

Herausgeber:

Umweltbundesamt

TEXTE 92/2021

Ressortforschungsplan des Bundesministeriums für
Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit

Forschungskennzahl 3716 33 325 0
FB000248

Abschlussbericht

Technische Potenzialanalyse zur Steigerung des Kunststoffrecyclings und des Rezyklateinsatzes

von

Florian Knappe, Joachim Reinhardt, Benedikt Kauertz
ifeu - Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH, Heidelberg

Rüdiger Oetjen-Dehne, Nadine Buschow
Oetjen-Dehne & Partner Umwelt- und Energie-Consult GmbH, Berlin

Michael Ritthoff, Dr. Henning Wilts
Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH, Wuppertal

Dr.-Ing. Martina Lehmann
MAKSC GmbH Magdeburger Kunststoff-Service Center, Barleben

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Impressum

Herausgeber

Umweltbundesamt
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau
Tel: +49 340-2103-0
Fax: +49 340-2103-2285
buergerservice@uba.de
Internet: www.umweltbundesamt.de

[f/umweltbundesamt.de](https://www.facebook.com/umweltbundesamt.de)

[t/umweltbundesamt](https://twitter.com/umweltbundesamt)

Durchführung der Studie:

ifeu - Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH
Wilckensstraße 3
69120 Heidelberg

Abschlussdatum:

November 2019

Redaktion:

Fachgebiet III 1.6 Kunststoffe und Verpackung
Dr. Franziska Krüger

Publikationen als pdf:

<http://www.umweltbundesamt.de/publikationen>

ISSN 1862-4804

Dessau-Roßlau, Juni 2021

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

Kurzbeschreibung

Mit dem Ziel ein qualitativ hochwertiges und effizientes Kunststoffrecycling zu stärken und den Einsatz von Kunststoffrezyklaten zu steigern, untersucht die vorliegende Studie das Potenzial technischer Innovationen und bewertet deren Wirkung auf die Umwelt. Dazu wird die gesamte Kunststoffverwertungsbranche in den Fokus genommen – angefangen bei der Sortierung von kunststoffhaltigen Abfällen über die Aufbereitung zu vermarktungsfähigen Kunststoffrezyklaten bis hin zu deren erneutem Einsatz in der Produktion.

Die Beschreibung des Standes der Technik für die jeweiligen Verfahrensschritte bildet die Basis für diese Untersuchung und erfolgt differenziert nach Abfallarten, Kunststoffsorten und Kunststoffverarbeitungsverfahren. Darauf aufbauend werden auf Grundlage von Literaturrecherchen, Expertengesprächen und eines internen Workshops mögliche, innovative technische Potenziale beim Kunststoffrecycling identifiziert und beschrieben.

Abschließend werden die ermittelten technischen Innovationen vergleichend zum dargestellten Stand der Technik aus ökologischer Sicht bewertet. Hierfür werden Wirkungsabschätzungen hinsichtlich des Treibhauseffektes, der Eutrophierung und Versauerung, Schonung/Verbrauch fossiler energetischer Ressourcen und gesundheitlicher Risiken vorgenommen. Auf diese Weise werden die mit einer technischen Innovation verbundenen Umweltentlastungserfolge erkannt und beschrieben. Die Studienergebnisse dienen als Grundlage für ein umweltbezogenes Benchmarking für die Kunststoffverwertungsbranche.

Abstract

This study examines the potential of technical innovations and assesses their impact on the environment with the aim of strengthening high-quality and efficient plastics recycling and increasing the use of recycled plastics. Therefore, the study focuses on the entire plastics recycling industry - from the sorting of plastic waste to the processing of marketable plastic recyclates and their reuse in production.

The description of the state of the art for the respective process steps forms the basis for this investigation and is differentiated according to types of waste, types of plastics and plastics processing methods. Based on this, possible innovative technical potentials in plastics recycling are identified and described on the basis of literature research, expert discussions and an internal workshop.

Finally, the technical innovations identified are evaluated from an ecological point of view by comparing them with the state of the art described before. For this purpose, impact assessments are made with regard to the greenhouse effect, eutrophication and acidification, conservation/consumption of fossil energy resources and health risks. In this way, the environmental relief successes associated with a technical innovation are identified and described. The study results serve as the basis for an environment-related benchmarking for the plastics recycling industry.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	7
Tabellenverzeichnis	9
Abkürzungsverzeichnis	10
Glossar	12
Zusammenfassung.....	14
Summary.....	30
1 Ziel des Forschungsvorhabens.....	45
2 Ermittlung und Beschreibung des Standes der Technik	47
2.1 Stand der Technik der Sortierung	47
2.1.1 Sortierung von Abfallgemischen aus der haushaltsnahen Wertstofferrfassung (Gemische aus LVP und anderen Wertstoffen)	49
2.1.2 Sortierung von gemischten Gewerbeabfällen, gemischten Bau- und Abbruchabfällen und Sperrmüll.....	56
2.1.3 Behandlung von Altfahrzeugen.....	62
2.1.4 Behandlung von Elektro- und Elektronikaltgeräten.....	66
2.2 Stand der Technik der werkstofflichen Verwertung.....	71
2.2.1 Verfahren der werkstofflichen Verwertung.....	72
2.2.2 Qualität der Altkunststoffzyklate.....	78
2.2.3 Emissionen und Umweltbelastungen im Zusammenhang mit der Altkunststoffaufbereitung	80
2.2.4 Detailbetrachtung	81
2.2.4.1 Recycling von PP und PE.....	81
2.2.4.2 Recycling von PET	84
2.2.4.3 Recycling von PVC.....	86
2.2.4.4 Recycling von PS	88
2.2.4.5 Recycling von Folien	89
2.2.4.6 Recycling von Kunststoffen der Schredderleichtfraktion	91
2.2.4.7 Recycling von Mischkunststoffen (LVP).....	93
2.3 Stand der Technik der Rezyklatanwendungen	94
2.3.1 Ausgewählte Produktbeispiele mit Kunststoffrezyklatanteil.....	95
2.3.2 Verarbeitungsverfahren	100
2.3.2.1 Extrusion.....	100
2.3.2.2 Spritzgießen.....	102
3 Ermittlung und Beschreibung technischer Potenziale.....	105
3.1 Wichtige Problemfelder beim Kunststoffrecycling.....	105

3.2	Einsatz von Rezyklaten - Beispiele aus der Praxis.....	106
3.3	Mögliche technische Innovationen.....	109
3.3.1	Sortierung.....	109
3.3.1.1	Einsatz weiterer Detektoren.....	110
3.3.1.2	Marker	111
3.3.1.3	Sortierung nach Form oder nach Material	112
3.3.1.4	Zusammenfassung, Potenziale bei der Sortierung.....	112
3.3.2	Aufbereitung	112
3.3.2.1	Wäsche	112
3.3.2.2	Separation	113
3.3.2.3	Optimierung von Extrudern und Spritzgussmaschinen.....	115
3.3.2.4	Zusammenfassung - Potenziale bei der Verwertung.....	115
3.3.3	Rezyklateinsatz.....	115
3.3.3.1	Limitation durch Kontaminationen	116
3.3.3.2	Kompatibilisierung.....	117
3.3.3.3	Veränderte Produktgestaltung.....	117
3.3.3.4	Zusammenfassung - Potenziale beim Rezyklateinsatz	118
3.4	Die Verfahren im Überblick	118
4	Ökologische Betrachtung.....	123
4.1	Allgemeine Rahmenbedingungen.....	123
4.1.1	Abfallmassenströme und ihre Zusammensetzung.....	123
4.1.2	Betrachtete Szenarien.....	124
4.1.3	Energiemix 2030.....	125
4.2	Schritte in der Verwertung – Festlegungen zu den Modulen.....	126
4.2.1	Sortierung.....	126
4.2.2	Aufbereitung	129
4.2.3	Erzielter Nutzen in Form von Substitutionserfolgen.....	132
4.3	Steigerung des Kunststoffrecyclings aus ökologischer Sicht - Bilanzierungsergebnisse	133
4.3.1	Darstellungsweise	133
4.3.2	Diskussion entlang der Wirkungskategorien und Summenparameter.....	134
4.4	Festlegung von Kriterien für die Bewertung von innovativen Techniken und technischen Verfahrensschritten.....	143
5	Fazit.....	144
6	Quellenverzeichnis.....	147
	Anhang.....	154

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Vereinfachte schematische Darstellung der trocken- / nassmechanischen Aufbereitung von Kunststoffen nach dem Stand der Technik	16
Abbildung 1:	Verarbeitete Kunststoffe je Einsatzbereich	45
Abbildung 2:	Schematische Darstellung einer LVP/WST- Sortierung nach dem Stand der Technik	49
Abbildung 3:	Funktionsprinzip Doppeltrommel-Unterdruck-Trenner	50
Abbildung 4:	Verteilung der Stofffraktion Kunststoffe auf die Outputfraktionen (exemplarisch)	55
Abbildung 5:	Schematische Darstellung einer Gewerbeabfall- Sortierung nach dem Stand der Technik	57
Abbildung 6:	Verteilung der Stofffraktion Kunststoffe auf die Outputfraktionen (exemplarisch)	60
Abbildung 7:	Schematische Darstellung der Behandlungsschritte des Altfahrzeug- Recyclings	63
Abbildung 8:	Kunststoffanteil in Elektro- und Elektronikgeräten je Produktkategorie	67
Abbildung 9:	Schematische Darstellung der Aufbereitung von großen und kleinen Elektroaltgeräten gemäß dem Stand der Technik (exemplarisch)	68
Abbildung 10:	Schematische Darstellung der Aufbereitung von Klima- und Kühlgeräten gemäß dem Stand der Technik (exemplarisch).....	69
Abbildung 11:	Verfahren der werkstofflichen Verwertung von Kunststoffen.....	73
Abbildung 12:	Vereinfachte schematische Darstellung der trocken- / nassmechanischen Aufbereitung von Kunststoffen nach dem Stand der Technik	73
Abbildung 13:	Trennprinzip der nassen Dichtentrennung im Gravitationsfeld der Erde – Schwimm-Sink-Verfahren	75
Abbildung 14:	Dichtentrennung im Zentrifugalfeld – Hydrozyklon (links) und Sortierzentrifuge (rechts)	76
Abbildung 15:	Mahlgut (links), Agglomerat (Mitte), Regranulat (rechts)	77
Abbildung 16:	PET-Flakes	85
Abbildung 17:	Dichtentrennverfahren für Kunststoffkonzentrate aus der EAG- Aufbereitung und Dichtebereiche der enthaltenen Kunststoffe (links) und Kunststoffmodifikationen (rechts)	92
Abbildung 18:	Elektrostatische Separation	93
Abbildung 19:	Rezyklateinsatz je Einsatzbereich im Jahr 2015.....	95
Abbildung 20:	Extrusionswerkzeug für Rohre.....	100
Abbildung 21:	Breitschlitzwerkzeug.....	101

Abbildung 22:	Blasfolienextrusion	101
Abbildung 23:	Extrusionswerkzeug zum Blasformen.....	102
Abbildung 24:	Ablauf des Spritzgießens.....	103
Abbildung 25:	Spritzgießwerkzeuge.....	103
Abbildung 26:	Preisentwicklung ausgewählter Altkunststoffe. Datengrundlage: EUWID Recycling und Entsorgung, versch. Ausgaben 2016-2018.....	121
Abbildung 27:	Die Verwertung von Kunststoffen und der Energieeinsatz	125
Abbildung 28:	Energiemix in der Stromerzeugung 2030	126
Abbildung 29:	Die Verwertung von Kunststoffen unter dem Aspekt Treibhauseffekt.....	135
Abbildung 30:	Die Verwertung von Schredder-Leichtfraktionen unter dem Aspekt Treibhauseffekt.....	135
Abbildung 31:	Die Verwertung von Kunststoffen unter dem Aspekt terrestrische Eutrophierung.....	136
Abbildung 32:	Die Verwertung von Shredder-Leichtfraktionen unter dem Aspekt terrestrische Eutrophierung	137
Abbildung 33:	Die Verwertung von Kunststoffen unter dem Aspekt Versauerungspotenzial	137
Abbildung 34:	Die Verwertung von Schredder-Leichtfraktionen unter dem Aspekt Versauerungspotenzial	138
Abbildung 35:	Die Verwertung von Kunststoffen unter dem Aspekt Feinstaubrisikopotenzial (PM 2,5)	138
Abbildung 36:	Die Verwertung von Schredder-Leichtfraktionen unter dem Aspekt Feinstaubrisikopotenzial (PM 2,5)	139
Abbildung 37:	Die Verwertung von Kunststoffen unter dem Aspekt Krebsrisikopotenzial	140
Abbildung 38:	Die Verwertung von Schredder-Leichtfraktionen unter dem Aspekt Krebsrisikopotenzial	140
Abbildung 39:	Die Verwertung von Kunststoffen unter dem Aspekt KEA (fos).....	141
Abbildung 40:	Die Verwertung von Schredder-Leichtfraktionen unter dem Aspekt KEA (fos).....	142
Abbildung 41:	Die Verwertung von Kunststoffen unter dem Aspekt aquatische Eutrophierung.....	142
Abbildung 42:	Die Verwertung von Schredder-Leichtfraktionen unter dem Aspekt aquatische Eutrophierung	143
Abbildung 43:	Verwertungssystem in einer ambitionierten Kreislaufwirtschaft	146

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Aufkommen und Entsorgung von Post Consumer-Kunststoffabfällen in Deutschland	46
Tabelle 2:	Ausbeuten der sortierten Kunststofffraktionen	53
Tabelle 3:	Reinheiten der sortierten Kunststofffraktionen - Soll und Ist	54
Tabelle 4:	Gebräuchliche thermoplastische Kunststoffe in Altfahrzeugen.....	62
Tabelle 5:	Sammelgruppen gemäß § 14 Absatz 1 ElektroG ab 01.12.2018	67
Tabelle 6:	Dichtebereiche für ausgewählte Kunststoffe und andere Materialien	74
Tabelle 7:	Qualität der PP-, PE-Rezyklate (exemplarisch)	83
Tabelle 8:	Verbrauchskenngrößen der trocken-/nassmechanischen Aufbereitung von PP und PE.....	84
Tabelle 9:	Erforderliche intrinsische Viskosität von PET je Anwendungsbereich	86
Tabelle 10:	Verbrauchskenngrößen der trocken-/nassmechanischen Aufbereitung von PET	86
Tabelle 11:	Sammel- und Verwertungssysteme für Kunststoff-Bauprodukte	87
Tabelle 12:	Anwendungsspezifische K-Werte für PVC (exemplarisch)	88
Tabelle 13:	Qualität der PS-Rezyklate (exemplarisch)	89
Tabelle 14:	Qualität der Folien-Rezyklate (exemplarisch).....	90
Tabelle 15:	Rezyklatausbeute Mischkunststoffe (LVP)	94
Tabelle 16:	Verbrauchskenngrößen der Aufbereitung von Mischkunststoffen (LVP).....	94
Tabelle 17:	Produktbeispiele mit Rezyklateinsatz.....	97
Tabelle 18:	Wirkungen der Maßnahmen (++ = deutlich mehr; + = mehr; o = unverändert; - = weniger; -- deutlich weniger)	119
Tabelle 19:	Umsetzbarkeit der Maßnahmen (++ = deutlich mehr; + = mehr; o = unverändert; - = weniger; -- deutlich weniger)	119
Tabelle 20:	Ökonomische Aspekte der Maßnahmen (++ = deutlich mehr; + = mehr; o = unverändert; - = weniger; -- deutlich weniger).....	121
Tabelle 21:	Die Zusammensetzung der Abfallfraktionen nach Kunststoffsorten	124
Tabelle 22:	Überblick über die angesetzten Selektivitäten in der Sortierung im Stand der Technik	128

Abkürzungsverzeichnis

ABS	Acrylnitril-Butadien-Styrol
BMUB	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit
BVT	Beste verfügbare Technik
CSB	Chemischer Sauerstoffbedarf
DUDT	Doppeltrommel-Unterdruck-Trenner
EAG	Elektronikaltgerät
EFSA	European Food Safety Authority
EPDM	Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk
EPS	Expandiertes Polystyrol
Fe	Eisen
FH	Fachhochschule
FKN	Flüssigkeitskartonage
FSK	Formstabile Kunststoffe
FSM	Flammschutzmittel
HDPE	Siehe PE-HD
HSI	Hyperspectral-Imaging
IR	Infrarot
IV	Intrinsische Viskosität
KST-HK	Kunststoff-Hohlkörper
LVP	Leichtverpackungen
MFR	Melt Mass-Flow Rate (dt. Schmelzflussindex)
MKS	Mischkunststoff/e
NE	Nichteisen
NIR	Nahinfrarot
NMVOC	Non-methane volatile organic compounds (flüchtige organische Verbindungen ohne Methan)
NOx	Stickoxide
PBT	Polybutylenterephthalat
PC	Polycarbonat
PE	Polyethylen
PE-HD	Polyethylen hoher Dichte, High Density Polyethylen (auch HDPE)
PE-LD	Polyethylen niedriger Dichte, Low Density Polyethylen
PET	Polyethylenterephthalat
pFR	polymeres Flammschutzmittel (polymeric Flame Retardant); auch PolyFR

PP	Polypropylen
PPK	Papier, Pappe, Kartonagen
PS	Polystyrol
PVC	Polyvinylchlorid
SLF	Schredderleichtfraktion
SNVP	Stoffgleiche Nichtverpackungen
SO₂	Schwefeldioxid
SSP	Solid State Polycondensation
UBA	Umweltbundesamt
UHDPE	Polyethylen ultra hoher Dichte, Ultra High Density Polyethylen
URRC	United Resource Recovery Corporation
UV	Ultraviolett
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
WST	Wertstoff

Einheiten

kWh	Kilowattstunde
Ma.-%	Massenprozent
Mg	Megagramm (1 Mg = 1 Tonne = 1.000 Kilogramm)
mg/m³	Milligramm je Kubikmeter
l	Liter
dl/g	Deziliter je Gramm
mg/kg	Milligramm je Kilogramm

Glossar

Ausbeute	Beschreibt den mengenmäßigen Anteil einer Produktfraktion am Gesamtmassenstrom des Zielproduktes im Input der Anlage. Die Ausbeute gibt lediglich ein Mengenverhältnis wieder und lässt keinen Rückschluss auf die Qualität der Produktfraktion zu. (siehe auch Reinheit und Selektivität)
Kunststoffzyklus	Ein aus Altmaterial hergestellter, verarbeitungsfähiger Kunststoff mit definierten Eigenschaften. Es wird unterschieden zwischen Mahlgut, Agglomerat und Regranulat.
Kunststoffsorte	Im Sinne dieser Studie u.a. Polyethylen (PE), Polypropylen (PP), Polyamid (PA), Polystyrol (PS), Polyethylenterephthalat (PET)
Post-Consumer-Abfälle	Vom privaten oder gewerblichen Endverbraucher erzeugte Abfälle.
Produktfraktion	Bei der Produktfraktion (Output Sortieranlage) handelt es sich um einen mit dem Zielprodukt angereicherten Stoffstrom, der darüber hinaus auch Anteile an Verunreinigungen (hier u.a. Papier, Metalle) enthält.
Reinheit	Bezeichnet den Anteil des erwünschten Zielproduktes in der Produktfraktion.
Relaxation	Bei der Extrusion wird im Extrudatstrang eine Schubspannung induziert. Aufgrund des viskoelastischen Verhaltens von thermoplastischen Kunststoffen wird die Spannung im System über die Zeit abgebaut, sie relaxiert.
Selektivität	Beschreibt, wie viel vom Ausgangsmaterial tatsächlich in den gewünschten Produktstrom gelangt. Es ist eine Kenngröße für den verfahrenstechnischen Wirkungsgrad eines Sortierprozesses.
Sortiertiefe	Beschreibt das Spektrum der in der Sortieranlage erzeugten Kunststoff-Vorprodukte (Zielprodukte). Das können bspw. mit Kunststoffsorten angereicherte Stoffströme dominiert von beispielsweise PE, PP, PS oder PET sein, aber auch Mischfraktionen wie Misch-PET oder Folien.
Stand der Praxis	Umfasst im Sinne dieser Studie die in Deutschland in der Praxis tatsächlich eingesetzte Technik für Verfahren, Einrichtungen und Betriebsweisen.
Stand der Technik	Beschreibt den aktuellen Entwicklungsstand fortschrittlicher, im Betrieb bewährter Verfahren, Einrichtungen und Betriebsweisen, der die Einhaltung gesetzlicher Zielvorgaben als gesichert erscheinen lässt [BImSchG, BMJV 2008].
Strangaufweitung	Wird die Kunststoffschmelze durch eine Düse gedrückt (Extrusion), erfahren die Moleküle eine Deformation. Aufgrund der viskoelastischen Eigenschaften von thermoplastischen Kunststoffen kommt es zu einer Rückformung. Der Extrudatstrang weitet sich am Düsenausgang auf. Wie stark sich der Strang aufweitet, ist abhängig von den charakteristischen Eigenschaften des Kunststoffes, der Düsenlänge, des Düsendurchmessers und der Abzugsgeschwindigkeit.
Stranggranulierung	Die austretende Schmelze wird in Strängen im Wasserbad abgekühlt und im Granulator zerkleinert. In Abhängigkeit der gewünschten Granulatform werden Düsenplattenform und Granulatorabzugsgeschwindigkeit angepasst. Die Abkühlparameter der Stränge nehmen Einfluss auf die

	Morphologie (z.B. Kristallisation) des Granulates.
Zielprodukt	Beschreibt die Materialsorte oder -gruppe, auf deren Auslese die Sortierung ausgerichtet ist. Hierbei handelt es sich bspw. um bestimmte Kunststoffsorten (z.B. PE, PP), Eisenmetalle, Papier, aber auch Mischfraktionen wie Folien (ein Gemisch unterschiedlicher Kunststoffsorten).

Zusammenfassung

I Ziel des Forschungsvorhabens

Einschlägige Studien zeigen, dass das Kunststoffabfallaufkommen aus Haushalten und dem Gewerbe (Post-Consumer-Bereich) in der Bundesrepublik Deutschland stetig ansteigt und bereits weit mehr als 5 Mio. Mg/a ausmacht. Diese Studien belegen auch, dass der Großteil dieser Kunststoffabfälle energetisch verwertet wird [Consultic Studie 2016, ReSek-Studie 2017]. Die hochwertige werkstoffliche Verwertung von Kunststoffabfällen, die durch die Substitution von Primärkunststoffen einen Beitrag zum Klima- und Ressourcenschutz leistet, stagniert dagegen seit geraumer Zeit.

Mit dem Ziel, das Recycling von Kunststoffen weiter auszubauen, untersucht die vorliegende Studie, ob und welche technischen Innovationspotenziale im Recyclingprozess existieren und welchen Effekt diese auf die Umwelt haben.

Die Studie befasst sich im Schwerpunkt mit der Untersuchung der mit Post-Consumer-Kunststoffabfällen befassten Kunststoffverwertungsbranche bzw. deren Prozesskettenglieder „Sortieranlagen“, „Kunststoffaufbereitungsanlagen“ und „Rezyklatanwender“.

Wesentliche Teilziele der Forschungsarbeit sind

- ▶ die Ermittlung und Beschreibung des Standes der Technik für die Bereiche Sortierung, werkstoffliche Verwertung von Kunststoffabfällen sowie für den Rezyklateinsatz,
- ▶ die Analyse des technischen Potenzials zur Steigerung des Kunststoffrecyclings und des Rezyklateinsatzes in Deutschland sowie
- ▶ die Festlegung von Kriterien für die Bewertung von innovativen Techniken und technischen Verfahrensschritten bezüglich ihres Umweltentlastungspotenzials.

II Ermittlung und Beschreibung des Standes der Technik

Zur besseren Nachvollziehbarkeit werden die Bereiche Sortierung, werkstoffliche Verwertung und Rezyklateinsatz getrennt voneinander betrachtet. Dabei umfasst der Bereich „Sortierung“ alle Verfahren, mit denen aus Abfallgemischen Vorprodukte für eine anschließende kunststoffspezifische Aufbereitung zur werkstofflichen Verwertung erzeugt werden. Diese Vorprodukte werden in der nächsten Stufe „werkstoffliche Verwertung“ zu vermarktungsfähigen Kunststoffrezyklaten aufbereitet. Der Bereich „Rezyklateinsatz“ umfasst in technischer Hinsicht die Verfahren, die unter Einsatz der Rezyklate marktfähige Produkte erzeugen. Der für die jeweiligen Bereiche beschriebene Stand der Technik stellt eine Momentaufnahme für das Jahr 2017 dar.

▶ Sortierung von kunststoffhaltigen Abfallgemischen:

In Abhängigkeit der eingesetzten Abfallmaterialien unterscheiden sich die Sortieranlagen im verfahrenstechnischen Aufbau, sodass die Beschreibung des Standes der Technik differenziert nach Inputmaterial erfolgt. Zur weiteren Charakterisierung der jeweiligen Sortierverfahren werden die Kennwerte *Sortiertiefe*, *Ausbeute*, *Reinheit*, *Selektivität* sowie *Verbrauchskenngrößen* und *Emissionen in die Umwelt* ergänzt.

- Abfallgemische aus der haushaltsnahen Wertstoffeffassung

In der Praxis generieren Anlagen zur Sortierung von Gemischen aus Leichtverpackungen (LVP) und stoffgleichen Wertstoffen (WST) derzeit mehr als 10 Sortierfraktionen, wovon allein acht Fraktionen auf unterschiedliche Kunststoffe entfallen. Standardmäßig werden verpackungstypische formstabile Kunststoffartikel aussortiert. Hierzu zählen Schalen, Flaschen und Becher aus Polypropylen (PP), Polyethylen (PE) und Polystyrol (PS). Darüber hinaus liegen am Ende der Sortierung Fraktionen aus Polyethylenterephthalat (PET), Folien, Mischkunststoffen, ein mit schwarzen formstabilen Kunststoffen angereichertes Gemisch sowie große Kunststoff-Hohlkörper (> 5 Liter)

vor. Die Anlagentechnik ist entsprechend komplex. Zunächst wird der Materialstrom zerkleinert und mittels Siebklassierung in 3 bis 5 Korngrößen aufgetrennt. Neben Windsichtern zur Folienabtrennung und Magnet- und Wirbelstromscheidern zur Eisen- und Nichteisenmetallabscheidung kommen etwa 20 Nahinfrarotaggregate (NIR-Trenner) zum Einsatz, die Pappe und Papier sowie die unterschiedlichen Kunststoffsorten erkennen und aus dem Abfallstrom ausschleusen. Darüber hinaus sind derzeit weiterentwickelte sensorgestützte Trennaggregate zur Sortierung schwarzer formstabiler Kunststoffe in der betrieblichen Umsetzung. Weitere Ansätze betreffen die Quantität und Qualität der Sortierung von Kunststofffolien, z.B. mittels eines sog. Doppeltrommel-Unterdruck-Trenners. Die Qualität der jeweiligen Sortierfraktion aus der LVP-Sortierung definieren die Produktspezifikationen der dualen Systeme. In der Praxis werden die geforderten Reinheiten insbesondere für die Kunststofffraktionen aufgrund zu hoher Störstoffanteile jedoch in der Regel nicht erreicht.

- Gemischte Gewerbeabfälle, gemischte Bau- und Abbruchabfälle, Sperrmüll

Die mechanische Aufbereitung von gemischten Gewerbeabfällen, Sperrmüll sowie gemischten Bau- und Abbruchabfällen erfolgt gemäß dem Stand der Technik in mehreren Stufen [Dehne et al. 2011]. Zunächst werden die Abfälle vorzerkleinert und dann durch Siebung und Windsichtung mehrfach klassiert. Magnet- und Wirbelstromscheider trennen eisen- und nichteisenmetallhaltige Bestandteile vom Gemisch ab. Darüber hinaus kommen zur Sortierung von Holz und Papier/Pappe NIR-Trenner zum Einsatz. Eine manuelle Sortierung ist ebenfalls Bestandteil der Sortierkette. NIR-Trenner zur Sortierung von Kunststoffen bzw. einzelner Kunststoffsorten werden in der Praxis bislang nur in wenigen Anlagen eingesetzt. Die Prozesstiefe wird dabei maßgeblich durch die Qualitätsanforderungen der Produktabnehmer bestimmt. Nicht als Stand der Technik gelten Anlagen, die nur eine Lagerung, Baggersortierung und den Umschlag beinhalten oder Anlagen, deren Sortierprozess nur aus einer Eisenmetallabscheidung und einer manuellen Sortierung ohne vorherige Klassierung besteht. Im Vergleich zu den LVP/WST-Sortieranlagen ist die Prozessführung und Systemauswahl bei den Sortieranlagen für die genannten Abfälle individueller und weniger standardisiert.

- Altfahrzeuge inkl. Schredderleichtfraktion

Die Behandlung von Altfahrzeugen regelt die Altfahrzeug-Verordnung (AltfahrzeugV) und umfasst die Demontage der Altfahrzeuge, das Schreddern der Restkarossen und die Aufbereitung der Schredderrückstände. Vor der Überlassung der Restkarosse an eine Schredderanlage müssen bestimmte Bauteile, Stoffe und Materialien entfernt und vorrangig der Wiederverwendung oder der stofflichen Verwertung zugeführt werden (Anhang Nr. 3.2.3.3 AltfahrzeugV). Die Demontage großer Kunststoffteile (z.B. Stoßfänger, Radkappen und Kühlerschutzgitter) zur stofflichen Verwertung erfolgt in der Praxis in nur sehr geringem Umfang (ca. 3 kg je Altfahrzeug) [UBA BMUB 2016]. Anschließend werden die Restkarossen in Schredderanlagen zerkleinert, nach Korngröße klassiert und unter Einsatz von Windsichtern und Magnetscheidern in drei Fraktionen getrennt: Schredderschrott, Schredderschwerfraktion (Nichteisenmetalle und u.a. Kunststoffe) und Schredderleichtfraktion (ein Gemisch aus u.a. Kunststoffen, Glas, Holz und Textilresten). Die Schredderrückstände werden vor allem zur Erhöhung der Metallausbeute weiter aufbereitet. Die Komplexität dieser sogenannten Post-Shredder-Verfahren reicht von einer einfachen Siebtrennung und Eisenmetallabscheidung bis hin zu Anlagen, die zusätzlich mit Hilfe von Wirbelstromscheidern und sensorbasierten Techniken vermarktungsfähige Stoffströme erzeugen. Die weitere Abtrennung von Kunststoffen aus Schredderrückständen spielt in Deutschland bislang noch eine untergeordnete Rolle. Derzeit befinden sich eine Anlage in Betrieb und eine weitere im Bau, die mit Hilfe bekannter Sortiertechnik (u.a. Siebung, Windsichtung) ein sogenanntes Kunststoffkonzentrat zum Recycling erzeugen. Die kunststoffhaltigen Rückstände werden aktuell maßgeblich energetisch verwertet.

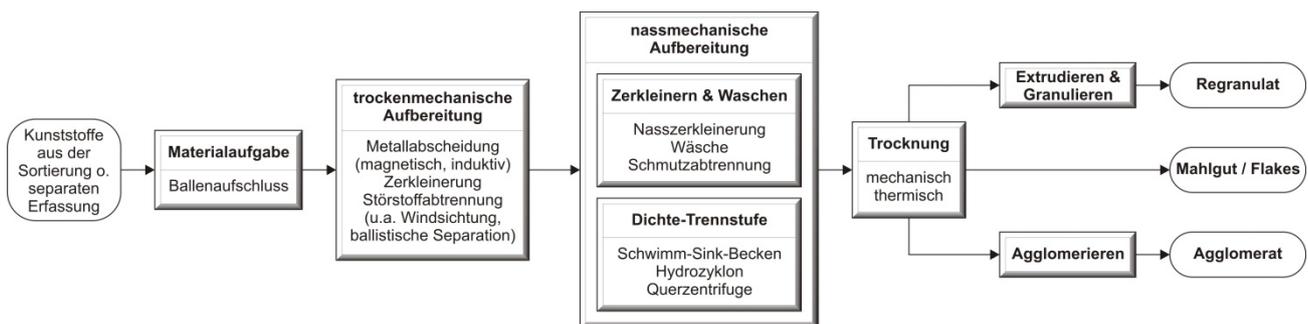
- Elektro- und Elektronikaltgeräte

Die Rücknahme und die umweltverträgliche Entsorgung von Elektro- und Elektronikaltgeräten (EAG) regelt das Elektro- und Elektronikgerätegesetz (ElektroG). Darüber hinaus konkretisiert die Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) in der novellierten Mitteilung 31B die technischen Anforderungen an die Behandlung und Verwertung von EAG gemäß dem Stand der Technik und beinhaltet u.a. Anforderungen an den Umgang mit Kunststoffen (z.B. gezielte Entnahme bromfreier Kunststoffe zur stofflichen Verwertung) [LAGA M31B 2018]. Alle erfassten EAG sind zunächst einer zertifizierten Erstbehandlung zuzuführen, die die Prüfung auf Wiederverwendbarkeit des Gerätes oder einzelner Bauteile sowie eine Schadstoffentfrachtung umfassen. Im Anschluss erfolgt eine mechanische Aufbereitung zur Erzeugung weitestgehend sortenreiner, verwertbarer Materialströme. In Abhängigkeit der zu behandelnden EAG unterscheiden sich die Erstbehandlungs- und anschließenden Aufbereitungsprozesse in Aufwand und Komplexität. In der Praxis liegt der Fokus der Materialrückgewinnung überwiegend auf einer möglichst vollständigen Separation der enthaltenen Metalle. In modernen Anlagen werden auch Kunststoffe für eine werkstoffliche Verwertung aussortiert. Dies erfolgt aktuell in noch nicht nennenswerter Größenordnung [Wilts et al. 2016]. Der Aufbereitungsprozess umfasst die teilweise mehrstufige Zerkleinerung, Klassierung und Sortierung. Durch den Einsatz von Wirbelstrom- und Magnetscheidern, Windsichtern und NIR-Trennern werden Eisenmetalle, Nichteisenmetalle und auch Kunststoffe als Vorkonzentrate für eine weiterführende Aufbereitung aussortiert.

► **Aufbereitung vorsortierter Kunststofffraktionen (werkstoffliche Verwertung):**

Die Kunststoff-Vorprodukte aus der Sortierung sowie die separat über Rücknahmesysteme erfassten Kunststoffabfälle sind das Ausgangsmaterial für die Herstellung vermarktungsfähiger Kunststoffrezyklate (Mahlgut, Agglomerat oder Regranulat). In einer Kombination aus trocken- und nassmechanischen Verfahrensschritten werden noch enthaltene Verunreinigungen (u.a. Papier, Metalle, Glas, Sand, Fremdkunststoffe) abgetrennt und ein Kunststoffprodukt mit definierten Eigenschaften erzeugt. Dieses Verfahren stellt den Stand der Technik dar und durchläuft dabei die in Abbildung 1 dargestellten wesentlichen Prozessschritte.

Abbildung 1: Vereinfachte schematische Darstellung der trocken- / nassmechanischen Aufbereitung von Kunststoffen nach dem Stand der Technik



Quelle: Eigene Darstellung

Je nach Zielpolymer sind Modifizierungen und gegebenenfalls weitere Prozessschritte erforderlich. So ist beispielsweise für die Aufbereitung von PET aus der Einwegflaschensammlung eine Heißwäsche zur vollständigen Entfernung von Klebstoff- und Getränkerückständen erforderlich. Im Gegensatz zur herkömmlichen Wäsche wird das Waschwasser erhitzt und mit Lauge sowie speziellen Waschmitteln versetzt. Im Rahmen dieser Studie werden die Aufbereitungsschritte von Polyolefinen (PE, PP, PE/PP-Gemische), Polystyrol (PS), Polyethylenterephthalat (PET), Polyvinylchlorid (PVC), Folien, Kunststoffen der Schredderleichtfraktion und Mischkunststoffen aus der LVP-Sortierung detailliert betrachtet. Die trockenmechanische Aufbereitung dient der Abtrennung loser Verunreinigungen (z.B. Eisen-, Nichteisenmetalle, Papier). Die sich anschließende nassmechanische Aufbereitung umfasst teilweise

mehrstufige Wasch- und Trennprozesse und dient der Entfernung anhaftender Verunreinigungen (u.a. Lebensmittelreste, Kosmetikbestandteile, Etiketten) und der Separation des Zielkunststoffes. In Nassschneidmühlen und/oder Friktionswäschern wird das Mahlgut durch Reibungseffekte und durch die Zufuhr von Wasser intensiv gereinigt. Die Rückgewinnung bestimmter Kunststoffsorten erfolgt mit Hilfe der Dichtentrennung im nassen Medium. Stand der Technik sind Schwimm-Sink-Becken, Hydrozyklone und Sortierzentrifugen. Im Anschluss an eine Trocknungsstufe wird das Mahlgut je nach Anforderung des Rezyklatabnehmers als Mahlgut/ Flakes bereitgestellt oder in einem abschließenden Prozessschritt zu Agglomeraten oder zu rieselfähigen Regranulaten aufbereitet.

Entscheidend für den Rezyklateinsatz sind die mechanischen, chemischen und thermischen Eigenschaften der Kunststoffrezyklate. Das Eigenschaftsprofil wird durch Alterungsprozesse (u.a. infolge von UV-Strahlung, Feuchtigkeit oder Temperatur), den Recyclingprozess selbst (mechanische, thermische Beanspruchung) oder sog. Vermischungsschäden (unvollkommene Trennprozesse oder Compoundierung der Ausgangsstoffe) beeinflusst. Zur Charakterisierung der Rezyklate gelten die gleichen Normprüfungen wie für Neuware [Maier et al. 2016]. Als Richtwerte dienen u.a. Schmelzflussindex, Schlagzähigkeit, Bruchdehnung, Streckspannung und Härte.

In Kunststoffverwertungsanlagen wird Wasser für Waschprozesse, die Nasszerkleinerung und die Dichtentrennung der Kunststoffe eingesetzt. Zur Minimierung des Frischwassereinsatzes wird das Prozesswasser möglichst im Kreislauf geführt und von eingetragenen Verschmutzungen weitestgehend gereinigt. Überschusswasser und Schlämme aus der Abwasserreinigung werden extern entsorgt.

► **Stand der Technik der Rezyklatanwendungen**

Kunststoffrezyklate können in Abhängigkeit ihrer Qualität in den unterschiedlichsten Anwendungen zum Einsatz kommen. Für die Bereiche Bauwirtschaft, Verpackungen, Haushalt, Büroartikel, Textilien, Elektrogeräte und Fahrzeuge wurden insgesamt 29 Produktbeispiele recherchiert, für deren Herstellung Kunststoffrezyklate aus Post-Consumer-Abfällen eingesetzt werden. Die auf Herstellerangaben und Expertenbefragungen basierenden Angaben machen Aussagen über die jeweils zum Einsatz kommende Kunststoffrezyklatsorte und das standardmäßige Verarbeitungsverfahren. Informationen zur erforderlichen Rezyklatqualität sind nicht verfügbar. Hierbei handelt es sich um sensible Informationen, die aus Wettbewerbsgründen nicht preisgegeben werden.

Für die Verarbeitung von Kunststoffrezyklaten kommen die gleichen Verfahren (Extrusion, Spritzgießen) zum Einsatz wie für Primärware. Neben der Anwendung selbst ist die Rezyklatbeschaffenheit für den Anwender jedoch hinsichtlich der Auswahl und der Auslegung der Verarbeitungstechnik ausschlaggebend. Denn im Rezyklat enthaltene Verunreinigungen (u.a. Glassplitter, Metalle, Fremdkunststoffe) können die nachgeschaltete Anlagentechnik schädigen und aufgrund unterschiedlicher Schmelzpunkte zu Fehlstellen im Produkt führen. Zusätzlich vorgeschaltete Filter können die Schmelze nochmals reinigen und der Einsatz verschleißbeständiger Materialien einzelne Anlagenteile schützen [VDMA 2017].

III Ermittlung und Beschreibung technischer Potenziale

Ausgehend von dieser Analyse des Stands der Technik wurden im zweiten Schritt Abschätzungen vorgenommen, welche weiteren Potenziale hinsichtlich der Steigerung der Ausbeute, Qualität und Effizienz beim Kunststoffrecycling sowie hinsichtlich der Erhöhung der Rezyklatanteile durch technische und systemische Innovationen erreichbar sein könnten. Das Arbeitspaket umfasst im Einzelnen die Identifikation innovativer Ansätze und Techniken, eine Bewertung der damit verbundenen Potenziale und Abschätzung der dadurch erreichbaren Umweltentlastungen und eine wirtschaftliche Einschätzung.

Die wesentliche Grundlage der Ausarbeitungen sind die Recherche und Auswertung von Literatur. Zudem wurde der Austausch mit der Praxis gesucht. Identifiziert werden sollten technische Potenziale und Innovationen für den deutschen Markt bzw. bezogen auf die Situation in Deutschland. Dies schließt im Einzelfall nicht aus, dass innovative technische Lösungen in anderen Ländern bereits eingesetzt und erprobt werden. Ein Großteil der verfügbaren Fachliteratur beschreibt Ergebnisse der universitären und außeruniversitären Forschung. Der Abstand dieser Forschungsergebnisse zur Umsetzung in die Praxis ist bisweilen groß. Die Frage ihrer Umsetzbarkeit in und ihrer Potenziale für die Praxis ist sowohl technisch als auch ökonomisch oft unklar. Insbesondere lassen sich weder Prozessparameter noch Ausbeuten oder Aufbereitungsqualitäten aus dem Labor- auf einen zukünftigen Produktionsmaßstab übertragen.

Zudem gilt es zu beachten, dass es vielfach einen erheblichen Abstand zwischen dem Stand der Technik und der industriellen Praxis gibt. Wie die Ausarbeitungen zeigen, liegt die Weiterentwicklung der Praxis des Kunststoffrecyclings vor allem in der Umsetzung des bereits vorhandenen Standes der Technik und wahrscheinlich weniger in der Erschließung weiterer technischer Innovationen.

Die wesentlichen Problemfelder im Recycling von Kunststoffabfällen sind:

- **Störstoffe**

Hierzu gehören z. B. Papier, Metalle, Fremdkunststoffe, Verbunde, aber auch mit Additiven versetzte Kunststoffe zur Verbesserung der Materialeigenschaften oder verschiedenste Verunreinigungen (z. B. Produktreste in Kunststoffverpackungen oder Erdanhaftungen bei Folien aus der Landwirtschaft). Eine Auf- und Abtrennung ist bereits mit bestehender Technik möglich. Vielfach entsprechen Praxisanlagen jedoch nicht dem Stand der Technik oder eine Steigerung der Effizienz und Effektivität der Verfahren ist wünschenswert.

- **Farbsortierung**

Die Farbe von Kunststoffen ist für eine Vielzahl von Anwendungen eine wichtige Eigenschaft. Da sich die Färbung nicht entfernen lässt und allenfalls eine Überfärbung, und damit dunklere Farben, möglich sind, kommt der Farbsortierung eine große Bedeutung zu. Beim PET-Recycling hat sich dabei inzwischen eine Flakesortierung etabliert. Bei anderen Kunststoffen erfolgt i.d.R. noch keine Farbsortierung, obwohl die Technik grundsätzlich verfügbar ist.

- **Geruch**

Die mögliche Geruchsbelastung ist vielfach ein entscheidendes Kriterium gegen einen Einsatz von Kunststoffrezyklaten, insbesondere bei Verpackungen, im Automobilbereich aber auch bei anderen Produkten, die in Innenräumen eingesetzt werden sollen. Eine Verringerung von Gerüchen ist daher eine wesentliche Voraussetzung für eine Steigerung des Rezyklateinsatzes in diesen Bereichen. Zur Verringerung der Gerüche können verschiedene wirksame Waschverfahren eingesetzt werden. Dem stehen in der Praxis Aufwand und die damit verbundenen Kosten entgegen.

- **Kontaminationen**

Kontaminationen können den Einsatz von Rezyklaten be- oder verhindern. Das trifft insbesondere auf den Einsatz in Lebensmittelverpackungen zu, aber auch für den Einsatz von Altkunststoffen aus Elektrogeräten und Bauprodukten, die häufig nicht mehr zugelassene Flammenschutzmittel enthalten. Derartige Kontamination aus Kunststofffraktionen zu beseitigen (etwa durch Lösemittelverfahren), kann daher mit einem erheblichen Potenzial zur Verbesserung des Einsatzes von Sekundärkunststoffen verbunden sein. In der Praxis jedoch kommen diese Lösungen bis dato aus wirtschaftlichen Gründen nicht bzw. kaum zum Einsatz. Klassisch ist das Bestreben, kontaminierte Kunststofffraktionen stattdessen aus dem für ein Recycling vorgesehenen Massenstrom auszu-schleusen.

In allen Schritten eines Kunststoffrecyclings – Sortierung, Verwertung, Rezyklateinsatz – spielen die Problemfelder Farbe und Geruch der Rezyklate eine entscheidende Rolle. Es fehlt weniger an innovativen technischen Lösungsansätzen. Entscheidendes Hemmnis stellen Investitionskosten dar und die Notwendigkeit, diese hinsichtlich dem Verbrauch an Energie, Wasser und Betriebsmitteln effizienter und damit ebenfalls wirtschaftlicher zu machen.

► **Die Identifikation innovativer Ansätze und Techniken im Bereich Sortierung**

Die Sortierung soll möglichst einfach und nutzbringend sein. Sie soll in einem Abfallstrom enthaltene Kunststoffe nach Sorten auftrennen und dies mit möglichst hoher Reinheit und möglichst geringem Aufwand. Diese Zielsetzung ist konfrontiert mit den häufig verwendeten Verbundmaterialien. Detektoren erkennen in der Regel die Kunststoffsorte der obersten Schicht. Rußgefärbte schwarze Kunststoffe lassen sich zudem nicht über NIR-Detektoren erkennen.

Eine hochwertige Verwertung der Kunststoffabfälle ist jedoch darauf angewiesen, dass eine saubere Auftrennung nach Kunststoffsorten erfolgt. In vielen Fällen reicht eine Auftrennung nach den Kunststoffsorten, für die es Recycling-Codes gibt, oft nicht. Problematisch sind die Additive, die nicht nur ihre letztendliche Verwertbarkeit erschweren. Additive (und Verunreinigungen) können die für die Sortierung angesetzten Eigenschaften überlagern, so dass sich nur gering unterscheidende Kunststoffsorten nicht mehr sauber auftrennen lassen. Vor diesem Hintergrund zeigen sich folgende technische Potenziale zur Verbesserung der Sortierung:

Einsatz weiterer Detektoren

Insbesondere die Trennung von (rußgefärbten) schwarzen Kunststoffen ist mit Schwierigkeiten verbunden. Ein Ansatz ist eine technische Innovation, die von verschiedenen Instituten der Fraunhofer-Gesellschaft [Bendel 2015] vorangetrieben wird. Es wird auf andere Frequenzen zurückgegriffen, die auch bei optisch intransparenten Kunststoffen eine sichere Detektion erlauben.

Grundsätzlich können auch elektromagnetische Strahlungen und die unterschiedliche Reaktion der bestrahlten Materialien zur Identifikation von Kunststoffen genutzt werden [Langhals et al. 2015]. Diese Identifikation über die jeweilige charakteristische Fluoreszenz soll auch eine sichere Unterscheidung in LDPE, HDPE und UHDPE ermöglichen. Auch soll eine Auftrennung der PET-Arten oder auch innerhalb von Silikonen möglich werden.

Ein weiterer Ansatz ist die Verwendung der RAMAN-Spektroskopie. Hier erfolgt eine Bestrahlung mit einer Erregerstrahlung hoher Intensität (UV-Licht bis sichtbares Licht). Das Licht wird nicht vom Material absorbiert, sondern gestreut. Die Streuung in den für die einzelnen Kunststoffe typischen Banden und Linien wird beobachtet und danach sortiert.

Für alle diese Ansätze gilt: Die Integration weiterer Detektoren in bestehende Sortieranlagen stößt aufgrund des zusätzlichen Platzbedarfs an Grenzen. Dies und die erheblichen Investitionskosten für die Verfahrenstechnik machen diese Lösungsansätze bislang unwirtschaftlich. Es besteht eine erhebliche Diskrepanz zwischen dem Stand der Technik und der Umsetzung in die Praxis.

Nutzung von Markern und digitalen Wasserzeichen

Klassisch ist damit die Nutzung fluoreszierender Marker gemeint, die entweder in die Kunststoffmatrix eingebracht oder über Aufdrucke und Etiketten aufgebracht werden können. Auch eine Autofluoreszenz und damit die Nutzung der natürlichen Fluoreszenzeigenschaften von Stoffen könnten möglich sein. Die Identifikation der Kunststoffe ist über Fluoreszenzspektroskopie und damit über grundsätzlich verfügbare Technik möglich. Die Nutzung von Etiketten und Aufdrucken ist nur dann hilfreich, wenn die Kunststoffe kompletter Bauteile oder Verpackungen identifiziert werden sollen, die übliche Sortierung der Flakes wäre nicht mehr möglich. Werden Marker in die Kunststoffmatrix eingebracht, führt dies zu dauerhaften Kontaminationen.

Digitale Wasserzeichen arbeiten mit Oberflächenstrukturen. In einem laufenden Projekt wird ihr Einsatz getestet. Die Versuchsergebnisse sind für Ende 2019 angekündigt [Pioneer Project HolyG-rail].

Sortierung nach Form

Die Sortierung nach Form erfolgt unter Zuhilfenahme von optischen Systemen, die bestimmte Kunststoffprodukte aussortieren lassen, die bekanntermaßen aus bestimmten Kunststoffen bestehen. Das Prinzip greift die alte Handsortierung auf und kommt bereits bei der Aufbereitung von Elektroschrott zum Einsatz [Drekopf 2019]. Die Sortierung nach Form ist als Vorsortierung gedacht, kann jedoch nicht einfach in bestehende Anlagen integriert werden, verspricht in Kombination mit einer nachgeschalteten Sortierung nach Kunststoffarten jedoch sehr hohe Sortierqualitäten.

In Summe lässt sich festhalten, dass für die Sortierung deutliche Potenziale zur Optimierung bestehen, die sich aus dem Zusammenspiel aus dem Einsatz von mehreren und anderen Detektoren, einer möglichen Markierung der Kunststoffe in den Produkten und einer Ergänzung der Sortierstrecken um ein vorgeschaltetes optisches Element nach Form ergeben.

► Die Identifikation innovativer Ansätze und Techniken im Bereich Aufbereitung

Die weitere Aufbereitung der Sortierfraktionen dient der gezielten Herstellung von Rezyklaten. Ziel ist die Entfernung der unterschiedlichsten Verunreinigungen und Störstoffe. Eine weitere Aufgabenstellung besteht auch in der vertiefenden Sortierung. Innovationen zielen auf die Zielerreichung ab. Neben einer Verbesserung der Aufbereitungserfolge ist hier auch ein Ziel in der Verringerung des Energie-, Wasser- und Betriebsstoffeinsatzes und betrifft alle Bereiche, d.h. die Zerkleinerung, den Transport aber auch Wäsche und Trocknung.

Wäsche

Um ein hochwertiges Recycling und einen zu Neuware gleichwertigen Einsatz der Rezyklate sicherzustellen, müssen die Anforderungen an Geruchsfreiheit und Farbe erfüllt sein. Viele der Verunreinigungen lassen sich über eine Wäsche beseitigen. Die technische Weiterentwicklung liegt hier in der Heißwäsche (eventuell Frikionsreinigung), dem Einsatz gezielt geschalteter Becken und der Zugabe von Tensiden. Die Ansätze sind bisher nur in wenigen Fällen realisiert.

Die Wäsche ist mit einem erheblichen Energie – und Betriebsmitteleinsatz verbunden. Eine weitere Bemühung liegt damit darin, den spezifischen Einsatz möglichst deutlich zu minimieren. Ein Ansatz ist auch die Kreislaufführung von Waschwasser. Es wird darum gehen müssen, eine geeignete Balance zwischen Qualitätsgewinn und Aufwand zu finden.

Separation

Nach der Zerkleinerung können verschiedene Trenntechniken eingesetzt werden. Klassisch ist die Trennung mittels Dichte und hier unter Einsatz von Wasser. Je nach Dichteverteilung werden dem Trennmedium entsprechende Zusätze beigegeben. Problematisch ist dieser Ansatz immer dann, wenn durch die Verwendung von Füllstoffen (bspw. Talkum) die spezifische Dichte der Kunststoffe verändert wird.

Für die Flakesortierung gibt es neue Ansätze wie den Einsatz von Lasern, um Verunreinigungen zu reduzieren. Dies sind Fourier-Transformation Nah-Infrarot (FT-NIR) oder RAMAN-Emissionsspektroskopie-Detektoren. Mit diesen Ansätzen können gemahlene Kunststoffe weiter getrennt werden. Diese Ansätze werden bislang nur in wenigen europäischen Anlagen eingesetzt und sind mit hohen Investitionen verbunden.

Die Grenzen der Schwimm-/Sinktrennung können teilweise durch Flotation und hier insbesondere Schaumflotation überwunden werden. Die Trennung lässt sich genauer und schärfer einstellen, so

dass auch eine Trennung von Stoffen ähnlicher Dichte möglich wird. Bei Versuchen wurde mit Schaumflotation und einer alkalischen Vorbehandlung unter optimalen Bedingungen eine sehr gute Abtrennung von PET gegenüber ABS, PS, PC und PVC erreicht. Die optimierte Abtrennung von PVC und PET wurde auch über die Oberflächenmodifikation mit Kaliumpermanganat erreicht.

Der Einsatz einer Flotation ist mit dem Einsatz zusätzlicher Flotationschemikalien, Wasser und Energie verbunden und erfordert Investitionen in neue Anlagen. Dies stellt zumindest unter den aktuellen Rahmenbedingungen die Wirtschaftlichkeit infrage. Flotationsverfahren befinden sich zudem in Konkurrenz zu anderen Trennverfahren wie bspw. der elektrostatischen Separation. Aufgrund fehlender praktischer Informationen ist eine Abwägung unter den Handlungsoptionen aus ökonomischer und ökologischer Sicht nicht möglich.

Die Identifikation innovativer Ansätze und Techniken im Bereich Extrudern und Spritzgussmaschinen

Zur Beseitigung von Störstoffen werden bereits heute Schmelzfilter und Schmelzfilter mit automatischer Reinigung bei Extrudern und Spritzgussmaschinen eingesetzt. Mit ihnen können z. B. metallische Beimengungen abgetrennt werden. Auch eine Abtrennung von unerwünschten Kunststoffen kann gelingen, wenn die Schmelzpunkte der Kunststoffe erheblich auseinanderliegen. Aktuelle Entwicklungen bei Schmelzfiltern betreffen insbesondere die Feinheit der Filter. Hier kommen zunehmend feinere Filter zum Einsatz (sogenannte Laserfilter, deren feine Siebstrukturen mit Hilfe von Lasern hergestellt werden). Daneben wird versucht, den Energieverbrauch von Extrudern zu minimieren und die Verweilzeit der Kunststoffe im Extruder, um die damit verbundene thermische Belastung und die Degradation der Kunststoffe zu verringern [plastverarbeiter 2017].

Zusammenfassung - Potenziale bei der Verwertung

In Hinblick auf die Notwendigkeit zur besseren Verwertung der Kunststoffabfälle bestehen technische Potenziale durch

- Verbesserung der Reinigungsleistung der Wäsche
- Verringerung des Energie- und Wassereinsatzes in der Wäsche
- Anforderungsgerechte Aufbereitung mit Verzicht auf nicht benötigte Verfahrensschritte
- Einsatz von neuen Sortiersystemen bei der Trennung von gemahlene Kunststoffabfällen
- Übertragung von Forschungsergebnissen zur Anwendung von Flotationsverfahren in die industrielle Anwendung

► Die Identifikation innovativer Ansätze und Techniken im Bereich Rezyklateinsatz

Es lassen sich verschiedenste Kunststoffprodukte finden, bei denen bereits heute erfolgreich Rezyklate eingesetzt werden. Sie stammen in der Regel jedoch aus besonders sortenreinen und sauberen Herkunftsbereichen und werden insbesondere in den Produkten eingesetzt, in denen hinsichtlich Farbe, Geruch und Festigkeit geringere Anforderungen gestellt werden. Es stellt sich immer die Frage, inwieweit auch in diesen bereits üblichen Bereichen Rezyklateinsatzquoten erhöht werden können. Die nachfolgenden Ausführungen sollen jedoch Möglichkeiten zur Erweiterung der Einsatzbereiche aufzeigen.

Limitation durch Kontamination

Kontaminationen wie Füllreste, Fremdstoffe oder Füllstoffe erschweren oder verhindern den Einsatz der Rezyklate, weil sie die Eigenschaften der Sekundärkunststoffe verschlechtern. Zu Konta-

minationen zählen auch chemische Zusätze, die heute nicht mehr erlaubt sind oder eine geschlossenes Kreislaufsystem erfordern – bspw. bestimmte Flammschutzmittel. So erweist sich ein Closed-Loop-Recycling von pFR PC/ABS aus dem Abfallmassenstrom aus der Aufbereitung von Flüssigkristallfernsehgeräten unter europäischen Randbedingungen als technisch machbar und wirtschaftlich vertretbar [Peeters et al. 2014].

Ein Problem können auch RFID-Tags darstellen, die heute auch vielfach im Verpackungsbereich eingesetzt werden. Es sind weniger negative Beeinflussungen der Kunststoffe zu erwarten, als vielmehr Betriebsprobleme (bspw. Verstopfen von Sieben). Diese Probleme lassen sich reduzieren, wenn Etikettmaterialien mit hoher Kompatibilität zu den Verpackungskunststoffen eingesetzt werden. Das Betriebsproblem durch die RFID-Antenne könnte technisch bspw. über selbstreinigende Filter gelöst werden, die aber noch nicht überall im Einsatz sind.

Kompatibilisierung

Kontaminationen von Sekundärkunststoffen lassen sich häufig nicht vollständig vermeiden. Eine Lösung kann sein, durch die Zugabe von Additiven die Kompatibilität zu erhöhen und Probleme beim Recycling zu vermindern. Hierzu steht eine Reihe von Kompatibilisatoren zur Verfügung [Pfaender 2016]. Bekannt ist, dass z.B. bei Elektrogeräten High Impact Polystyrol (HIPS), Acrylnitril-Butadien-Styrol (ABS), Polystyrol (PS) und gefülltes Polypropylen (PP) eingesetzt werden. Diese Kunststoffe lassen sich jedoch nicht leicht vollständig trennen. Eine Erhöhung der Kompatibilität durch Additive kann hier helfen, unerwünschte Wirkungen einzugrenzen.

Neben den Verunreinigungen durch Fremdkunststoffe treten auch andere Kontaminationen auf, deren Wirkung durch Additive verringert werden kann. Durch Metalldesaktivatoren lässt sich die Wärmestabilität bei metallischen Verunreinigungen verbessern und durch Kopplungsagentien die Haftungseigenschaften von Füll- und Verstärkungstoffen.

Eine weitere Möglichkeit besteht in der Mikronisierung (Feinvermahlung) und hier beim Recycling polymerer Mehrstoffprodukte. Dies ist mit einem zusätzlichen Aufbereitungsschritt verbunden, der zudem einen hohen Energiebedarf aufweist.

Veränderte Produktgestaltung

Durch die Produktgestaltung kann das Recycling erheblich beeinflusst werden. Dies betrifft bspw. die Trennbarkeit und Identifizierbarkeit von Kunststoffen. Aus Gründen des Umwelt- und Ressourcenschutzes sollten die Recyclingfähigkeit und auch der Rezyklateinsatz einen größeren Stellenwert im Produktdesign erhalten.

► Verfahren im Überblick

Die identifizierten Verfahren zielen insbesondere auf eine Verbesserung der Qualität der Rezyklate ab. Die Ausbeute an Kunststoff wird i.d.R. verringert, da Störstoffe und Verunreinigungen effektiver beseitigt werden und damit die Gesamtmasse verringert wird. Durch eine Verbesserung der Qualität ist es jedoch u.U. möglich, den Anteil an Rezyklat im neuen Produkt sogar zu erhöhen oder auch neue Anwendungen für den Rezyklateinsatz zu erschließen.

Die Verfahren sind häufig mit einem erhöhten Energieverbrauch verbunden und gehen teilweise mit einem erhöhten Verbrauch von Wasser und Betriebsmitteln einher. Der zusätzliche Energieaufwand zusätzlicher Detektoren ist dabei relativ gering, wohingegen etwa der Energieaufwand für eine Heißwäsche hoch ist. Quantitative Angaben sind jedoch kaum möglich, da sie von einer Vielzahl von Parametern abhängen und nicht allgemein angegeben werden können. Ähnliches gilt für allgemeingültige Aussagen zur verbesserten Anlagengestaltung. Die Verfahren sollten individuell in Hinblick auf die Abfälle und die erwarteten/benötigten Produkte ausgewählt werden.

Tabelle: Wirkungen der Maßnahmen (++ = deutlich mehr; + = mehr; o = unverändert; - = weniger; -- deutlich weniger)

	Maßnahme	Energieverbrauch	Betriebsmittel	Wasserverbrauch	Qualität	Ausbeute	Rezyklatanteil
Sortierung	weitere Detektoren	+	o	o	+	- bis +	+
	Einsatz von Markern	+	o	o	+	+	+
	Sortierung nach Form und Material	+	o	o	+	+	+
Verwertung	Heißwäsche	++	o	o	+	o	+
	Einsatz mehrerer Becken zur Wäsche	o	o	+	+	o	+
	Andere Waschverfahren (energie- und wassersparende Verfahren)	-	o	-	o	o	o
	Einsatz von Tensiden	o	+	o	+	o	+
	Lasersortierung	+	o	o	+	-	+
	Flakesortierung	+	o	o	+	- bis +	+
	Flotation	+	+	+	+	o	+
	Kontaminationen besser einschätzen	o bis +	o	o	+	+	+
Rezyklateinsatz	Kompatibilisierung	o bis +	+	o	+	+	+
	Vermeidung von Verbunden	+	o	o	o	+	o

IV Ökologische Betrachtung

In diesem Kapitel sollen der Stand der Technik im Recycling von Kunststoffen und die Möglichkeiten zur Entwicklung der technischen Potenziale aufgegriffen und aus ökologischer Sicht bewertet werden. Die Bewertung erfolgt vergleichend zueinander. Ziel ist es, die mit einer technischen Innovation verbundenen Umweltentlastungserfolge zu erkennen und zu beschreiben.

Hierfür sind folgende Arbeitsschritte notwendig:

- Erarbeitung der Grundlage zur Bewertung des Umweltentlastungspotenzials,
- Bilanzierung der innovativen Techniken
- Bewertung der Optimierung des Einsatzes von Rezyklaten

► Grundlagen zur Bewertung des Umweltentlastungspotenzials

Das Forschungsprojekt zielt auf die Analyse der technischen Möglichkeiten zur Steigerung des Kunststoffrecyclings und der Rückführung der Kunststoffrezyklate in den Wirtschaftskreislauf. Diese Analy-

se erfolgt jedoch am Beispiel von Abfallfraktionen, die aus Abfallgemischen bestehen. Aufwand und Nutzen lässt sich nur dann nachvollziehen, wenn eine Allokation auf die jeweiligen Kunststoffanteile durchgeführt wurde. Zur Beschreibung der mittleren Zusammensetzung von gemischten Bauabfällen wurde mit [Wilts et al. 2016] auf eine Studie zurückgegriffen, die die jeweiligen Mengen an verarbeiteten Kunststoffen im Baubereich aufführt, die ins Verhältnis zueinander gesetzt werden konnten. Für **gemischte Bauabfälle** wurden vor allem 39% PVC-Folien, 13% sonstiges PVC, 20% PE und 8% PP angesetzt. Die Zusammensetzung **gemischter Gewerbeabfälle** wurde einer Studie für das Umweltbundesamt [Dehne et al. 2015] entnommen. Sie besteht demnach vor allem aus 44% Folien LDPE, 26% PP und 25% PE. Für **Sperrmüll** wurden Hartkunststoffe angesetzt und damit zu je 50% HDPE und PP. Werden Elektro- und Elektronikartikel sowie Fahrzeuge aufbereitet, fallen die Kunststoffe als Teil der **Schredder-Leichtfraktion** an. Für die Elektroaltgeräte wurden vor allem ABS, HIPS und PP angenommen, für die Altfahrzeuge vor allem PP, ABS und PVC. In beiden Fraktionen sind zudem in Höhe von ca. 22% weitere Kunststoffe enthalten, die wie bspw. PUR nicht Gegenstand der Untersuchung sind. Zur Zusammensetzung der **Leichtverpackungen** liegen viele Informationen vor, die hier zugrunde gelegt werden konnten. 36% sind demnach bspw. Folien aus LDPE, 14% ist PP.

Für jede der diskutierten Abfallarten werden die mit einer Verwertung jeweils verbundenen Lasten aufbilanziert und dem damit verbundenen Nutzen gegenübergestellt. Entscheidend ist jeweils, wie hoch der Anteil welcher Kunststoffsorte liegt, der einer stofflichen Verwertung zugeführt werden kann und dort Primärkunststoffe ersetzt und welche Anteile als minderwertig einer energetischen Verwertung übergeben werden müssen. Dabei wird unterstellt, dass die Rezyklate so eingesetzt werden können, dass die Produktionsprozesse jeweils im Wesentlichen beibehalten werden können. Referenzfluss ist jeweils die Verwertung von 1.000 kg Kunststoff. Es werden jeweils zwei **Szenarien** unterschieden, nämlich der Stand der Technik und das Optimierungspotenzial.

Die Bewertung wird wesentlich von der Frage der **Energiebereitstellung** bestimmt. Das benötigte Betriebsmittel in der Verwertung ist vor allem Strom. Auch die mit der energetischen Verwertung verbundenen Substitutionserfolge werden wesentlich von der Energie bestimmt. Ein Vergleich des Standes der Technik mit einem Optimierungsszenario ist immer mit einer Zeitverschiebung verbunden. Die Bereitstellung erfolgt in Zukunft jedoch mit einem deutlich anderen Energieträgermix, der für 2030 mit dem Klimaschutzszenario 95 [Reppinger et al. 2015] unterlegt wurde, nach dem sich die Treibhausgasemissionen um 95% senken lassen. Dies wird vor allem über Strom aus Windkraft erreicht.

► Bilanzierung der innovativen Techniken und Verwertungsschritte

Sortierung

Bei einer Sortierung (und weiteren Aufbereitungsschritten) verbleiben zwangsläufig Massen, die nicht der Zielfraktion zuzuordnen sind. Für sie wird eine energetische Verwertung im Zementwerk (78%) oder in einer MVA (22%) angesetzt. Handelt es sich um PVC, erfolgt die Entsorgung ausschließlich über eine MVA. Die Verwertung im Zementwerk setzt eine Aufbereitung zu Ersatzbrennstoff voraus.

Für **gemischten Bauabfall** sowie die **gemischten Gewerbeabfälle** wird in dem Zukunftsszenario unterstellt, dass sich die vorhandenen Kunststoffsorten zu 70% jeweils in der Zielfraktion finden lassen, verbunden mit einem etwas höheren Strombedarf. Für den Status Quo wurde im Mittel über die Kunststoffsorten eine Quote von 50% angesetzt. Die Ausbeuten sind dabei für die einzelnen Kunststoffe unterschiedlich, bei Folien bspw. wurden 65% angenommen, für EPS 18%. Für **Sperrmüll** wurden für HDPE und PP im Status Quo Quoten von jeweils 48% und für die Zukunft von 70% angenommen.

Auch für die **Leichtverpackungen** wird unterstellt, dass eine Optimierung der Sortierung in Zukunft eine Überführung der Kunststoffe zu 70% in die Zielfraktion ermöglichen wird. Zusätzlich entsteht auch eine Sortierfraktion Mischkunststoffe, in die dann noch jeweils 5% der Massen gelangen. In den Leichtverpackungen liegen Kunststoffe aber auch als Materialverbunde vor, die in Zukunft zu 75% in einer Mischkunststofffraktion landen und nicht mehr vor allem als Sortierrest entsorgt werden müssen.

Die **Kunststoffe in Elektro-/Elektronikaltgeräten (EAG) und Altfahrzeugen** werden vor der Aufbereitung teilweise im Rahmen der manuellen Demontage vorsortiert. In der Aufbereitung der Schredderrückstände in Post-Schredder-Verfahren entsteht ein Mix an Kunststoffsorten, der dann in der Aufbereitung weiter aufgetrennt und zu Rezyklaten verarbeitet wird.

Aufbereitung

Die darauf folgende Aufbereitung unterscheidet sich für die verschiedenen Abfallarten kaum. Es wird davon ausgegangen, dass sich die klassischen Sortierfraktionen unabhängig von der Herkunft aus den verschiedenen Abfallarten nicht unterscheiden. Es wird unisono eine Ausbeute von 97% unterstellt, bezogen auf die Trockensubstanz. Nur für formstabile Teile aus PET aus dem Nicht-Verpackungsbereich werden 90% angenommen, für technische Kunststoffe wie bspw. ABS 65%. Nach dem Stand der Technik lassen sich dadurch Rezyklate herstellen, die zu 90% Primärkunststoffe substituieren können und sich zu 10% für die Herstellung von einfachen Kunststoffprodukten verwenden lassen.

Der Energieeinsatz ist für die Aufbereitung vergleichsweise hoch. Er liegt für die Aufbereitung von EPS bspw. bei etwa 800 kWh/t, bei der Aufbereitung von Folien in der Spanne von 400 kWh/T bis 1.100 kWh/t. Mit der Optimierung erhöht sich der Strombedarf nochmals deutlich. Zudem wird der Einsatz von Waschchemikalien berücksichtigt sowie Soda für die Flotation.

Dieser deutlich höhere Aufwand wird dadurch honoriert, dass zum einen für alle Kunststoffe eine Ausbeute von 97% angenommen und unterstellt wird, dass sich die gesamten Massen hochwertig als Rezyklat einsetzen lassen und zur Substitution von Primärkunststoff führen.

Bei der Aufbereitung von Schredder-Leichtfraktionen liegt die Ausbeute deutlich niedriger. Bezogen auf die Trockensubstanz werden 65% unterstellt. Die restlichen Massen gelangen in eine energetische Verwertung, wobei für den Stand der Technik nur bei ABS, HIPS, PE und PP eine werkstoffliche Verwertung angesetzt wird. Auch hier lassen sich durch eine Optimierung in Zukunft deutlich höhere Erfolge erzielen.

Die Aufbereitung der Sortierfraktion Mischkunststoffe erfolgt nach dem Stand der Technik für 65% mit dem Ziel einer Produktion von Ersatzbrennstoffen. Die übrigen Massen werden zu einfachen Produkten aufbereitet. Auch für diese Sortierfraktion wird eine Optimierung unterstellt, die sich aus dem Einsatz von Laser- und Flakesortierung nach Farbe sowie Windsichtung ergibt. Dadurch soll sich der Anteil, der zu Ersatzbrennstoffen aufbereitet werden muss, auf 50% beschränken lassen.

Substitutionserfolge

Sämtliche Anteile, die sich nach Sortierung und Aufbereitung nicht werkstofflich verwerten lassen, werden energetisch als Brennstoff im Zementwerk genutzt. Hier wird eine Substitution von 100% von Steinkohle angenommen.

Regranulate erreichen nicht ganz die Qualitäten und Spezifikationen der Granulate auf Rohstoffbasis. Insbesondere beim Stand der Technik ist der Substitutionsfaktor nicht 1:1. Für den Stand der Technik wurden für Kunststoffsorten und die Shredder-Leichtfraktion 0,8 angesetzt, für Folien 0,7

und für Mischkunststoffe als Ausgangsmaterial 0,6. Nach einer Optimierung verändern sich diese Quoten auf 0,9 und verbleiben nur für die Materialien aus Mischkunststoffen bei 0,7.

Um die Umweltlasten der verschiedenen Kunststoffe abbilden und damit die Substitutionserfolge berücksichtigen zu können, wurden die für den Wirtschaftsverband Plastics Europe bereit gestellten Ökopprofile ausgewertet. Die Datensätze repräsentieren eine nahezu aktuelle Situation. Eine Fortschreibung der Datensätze für das Zukunftsszenario war nicht möglich.

► **Steigerung des Kunststoffrecyclings aus ökologischer Sicht - Bilanzierungsergebnisse**

Aus diesen Überlegungen und Annahmen lassen sich für die einzelnen Anfallarten und die enthaltenen Kunststoffanteile Verwertungswege bilanzieren und bewerten und dies getrennt nach dem Stand der Technik und der zukünftigen Optimierung (Szenarien opt). Die Darstellung erfolgt nach den einzelnen Umweltwirkungskategorien getrennt, wobei an dieser Stelle alleine auf die Ergebnisse zum Treibhauseffekt eingegangen werden soll.

Die Ergebnisdarstellung besteht für jedes Szenario aus drei Balken, welche die folgenden Elemente darstellen (von links nach rechts):

- Sektorale Ergebnisse der Lasten des Aufbereitungsprozesses – positive Staffelbalken (Systemlasten)
- Gutschriften für Sekundärprodukte, die das System verlassen (vermiedene Lasten für Primärmaterialherstellung) – negative Staffelbalken (Gutschriften)
- Nettoergebnisse: Gesamtumweltlast abzüglich der Gutschriften – grauer Balken Netto-Ergebnis

Auf Lastenseite werden folgende Sektoren betrachtet:

- Sortierung: Energiebedarf für den Sortierprozess bzw. die Post-Schredder-Verfahren bei den Fraktionen Altfahrzeuge und Elektroaltgeräte (EAG)
- Stoffliche Aufbereitung: Energie- und Betriebsmittelbedarf für die Aufbereitung der Kunststoffe, die Richtung Ziel-Kunststoffsorte sortiert wurden sowie der Schredder-Leichtfraktion aus Altfahrzeugen und EAG
- Mischkunststoff (MKS)-Aufbereitung: Energie- und Betriebsmittelbedarf für die EBS- und werkstoffliche Aufbereitung der MKS-Fraktion aus der LVP-Sortierung und energetische Verwertung des nicht werkstofflichen Teils in Zementwerken
- Sortierreste energetisch: energetische Verwertung der nicht Richtung werkstoffliche Aufbereitung aussortierten Kunststoffe in Müllverbrennungsanlagen (MVA) und Zementwerken
- Aufbereitungsreste energetisch: energetische Verwertung der bei der Aufbereitung anfallenden Reste in Zementwerken und MVAs

Auf Gutschriftenseite ist folgende Unterteilung getroffen:

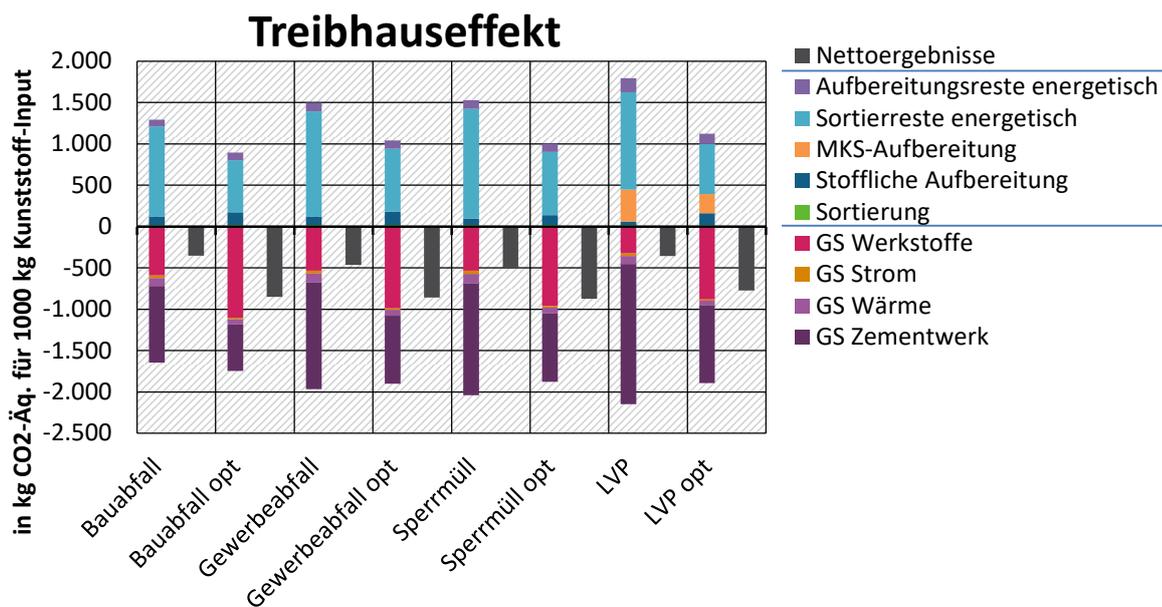
- Gutschrift (GS) Werkstoffe: Vermiedene Produktionslasten der substituierten Primärkunststoffgranulate bzw. Holz- und Betonprodukte; Herstellungslasten wie heute angesetzt
- GS Strom: in MVAs produzierter Strom, der den deutschen Strommix im Jahr 2030 substituiert
- GS Wärme: in MVAs produzierte Wärme, die Wärme aus Erdgaskesseln substituiert
- GS Zementwerk: Substitution von Steinkohle durch Verbrennung (Marginalansatz)

Alle Indikatorergebnisse beziehen sich auf die Aufbereitung von 1.000 kg Kunststoffabfällen (funktionelle Einheit).

Betrachtet man zunächst die Lasten, fällt die große Bedeutung der Umweltlasten ins Auge, die mit der energetischen Verwertung oder thermischen Beseitigung von Behandlungsrückständen, aber auch der Sortierreste verbunden sind. Sie sind deutlich höher als diejenigen, die aus dem Energie- und Betriebsmitteleinsatz für die eigentlichen Aufbereitungsprozesse zur werkstofflichen Verwertung resultieren. Im Zuge der Verbrennung der Kunststoffe in MVAs und Zementwerken wird Kohlendioxid aus fossilen Quellen (erdölbasierte Kunststoffe) emittiert. Auch der größere Anteil an Umweltlasten bei der Aufbereitung von Mischkunststoffen aus der Verwertung der Leichtverpackungen ist darauf zurückzuführen. Sie werden zu einem großen Teil zu EBS aufbereitet und in Zementwerken verbrannt.

Die Lasten verändern sich im Zuge aller Optimierungen. Der höhere Aufwand für die Sortierung und Aufbereitung wird deutlich, ist aber durch den sich ändernden Energiemix für das Jahr 2030 begrenzt. Da aber gleichzeitig deutlich weniger Massen einer energetischen Nutzung zugeführt werden, weil mit der Optimierung vor allem eine Steigerung des werkstofflichen Anteils verbunden ist, liegen die daraus resultierenden Lasten deutlich niedriger. „In Summe“ bedeutet dies deutlich geringere Lasten aus den Verwertungssystemen.

Abbildung: Die Verwertung von Kunststoffen unter dem Aspekt Treibhauseffekt



Werden die Ersatzbrennstoffe in Zementwerken eingesetzt und substituieren dort den Einsatz von Steinkohle, ist die energetische Verwertung auch mit entsprechend hohen Substitutionserfolgen verbunden. Die daraus resultierenden Gutschriften bei allen Abfallströmen deutlich. Ihre Bedeutung nimmt parallel zur Mengenverschiebung durch die Optimierung der Verwertung ab. Diese Mengenverschiebung in Richtung werkstoffliche Verwertung zeichnet sich ebenfalls deutlich in den Gutschriften für die Substitution von Primärrohstoffen ab. Die hierfür errechneten Werte verdoppeln sich oft nahezu. Die Gutschrift für die Energiebereitstellung in Zementwerken ist aufgrund des auch zukünftig angesetzten Marginalansatzes, nach welchem dort Steinkohle substituiert wird, als maximale Abschätzung anzusehen.

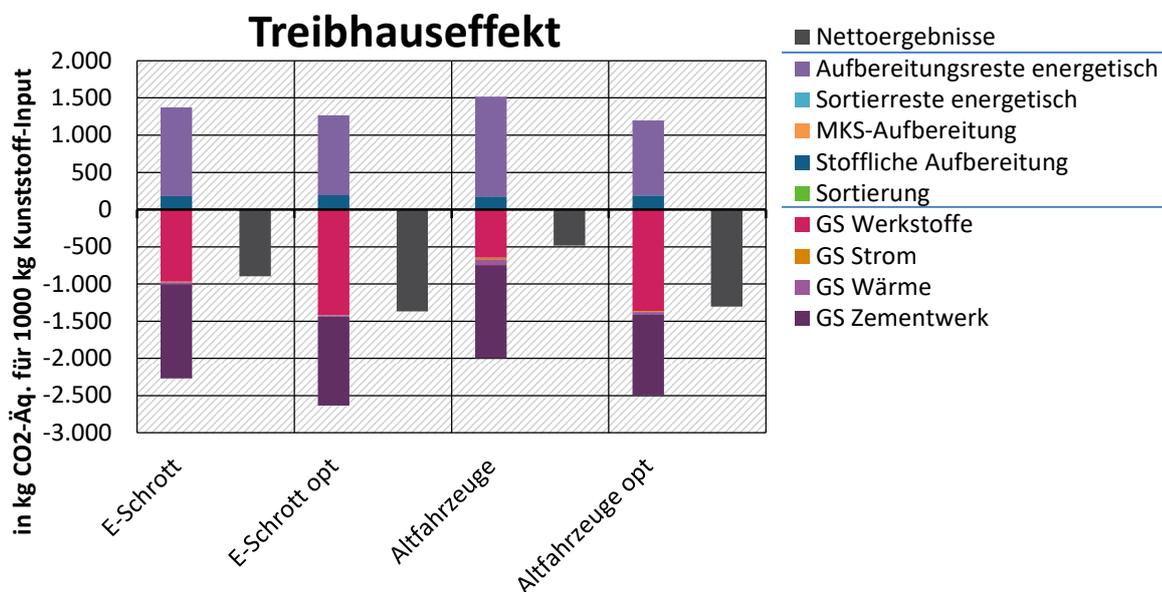
„In Summe“ sind die Optimierungen zumeist mit einer kleinen Schmälerung der Substitutionserfolge und Gutschriften verbunden, der Effekt der verringerten Substitution von Kohle in Zementwerken überwiegt den des Anstiegs in der Kunststoffsubstitution etwas.

Die Netto-Ergebnisse zeigen über alle Abfallfraktionen hinweg durch die Optimierung hingegen eine deutliche Verbesserung der Bewertungsergebnisse, weil die Verlagerung von der energetischen Verwertung u.a. in Zementwerken in Richtung Kunststoffsubstitution in Summe aus deutlich geringeren Lasten und nur etwas geringeren Gutschriften deutliche Reduktionen beim Treibhauseffekt ermöglicht. Netto erzielt die energetische Verwertung der Kunststoffe in den Zementwerken keine Entlastung, die stoffliche Verwertung zu hochwertigen Rezyklaten hingegen schon. Die Netto-Entlastungen verdoppeln sich durch die Optimierung daher teilweise.

Über die werkstoffliche Verwertung von technischen Kunststoffsorten und v.a. PA aus den Abfallfraktionen Elektroaltgeräte und Altfahrzeuge können Primärkunststoffe mit sehr hohen spezifischen Herstellungslasten substituiert werden, so dass über die Optimierung größere Einsparungen erzielt werden können. „Netto“ sind die mit der Optimierung verbundenen Erfolge größer als diejenigen, die aus den anderen Abfallfraktionen erzielt werden können.

Dies relativiert sich mengenmäßig aber wieder, da die Kunststoffabfallmengen aus dem Bereich der Elektro/Elektronik und Fahrzeuge jeweils nur 5 % der gesamten Kunststoffabfälle ausmachen.

Abbildung Die Verwertung von Schredder-Leichtfraktionen unter dem Aspekt Treibhauseffekt



V Fazit

Mit der vorliegenden Studie soll insbesondere das für Deutschland bestehende technische Potenzial für eine Steigerung des Kunststoffrecyclings und des Rezyklateinsatzes identifiziert werden. Hierzu zählen Sortierprozesse, Prozesse der Kunststoffaufbereitung sowie nicht zuletzt der Einsatz der Rezyklate selbst. Die Optimierung des Kunststoffrecyclings und damit die Erhöhung der werkstofflich hochwertig verwerteten Anteile an Kunststoffabfällen ist kein Selbstzweck. Die Optimierung zielt auf eine möglichst deutliche Umweltentlastung. Aufwand und Nutzen müssen demnach in einem guten Verhältnis zueinander stehen.

Wie im Rahmen der Studie deutlich wurde: Die derzeit bestehenden technischen Möglichkeiten werden in Deutschland nicht in vollem Umfang ausgeschöpft. Die in der Praxis zum Kunststoffrecycling eingesetzten Techniken und Prozesse weichen teilweise deutlich vom Stand der Technik ab. Darüber hinaus konnten zahlreiche technische Ansätze identifiziert werden, die insbesondere auf eine Verbesserung der Qualität der Rezyklate abzielen, da diesbezüglich teilweise noch relevante Hemmnisse für

deren Einsatz in Neuprodukten bestehen. Diese technischen Optimierungspotenziale adressieren dabei sowohl die Sortierung und die Aufbereitung der Altkunststoffe als auch den Rezyklateinsatz.

Wie aus den Ergebnissen deutlich wird, ist die postulierte Steigerung der werkstofflichen Verwertung von Kunststoffabfällen aus ökologischer Sicht sehr sinnvoll. Dies geht zwar zu Lasten der Quantität und ist insbesondere durch den Einsatz zusätzlicher Aggregate mit einem erhöhtem Energie-, Wasser- und ggf. Betriebsmittelverbrauch verbunden. Dies ist angesichts der zukünftig umweltfreundlicheren Produktion und Bereitstellung von elektrischer Energie aus überwiegend erneuerbaren Quellen immer gerechtfertigt.

Dies bedeutet nicht, dass man auch für einzelne Verfahrensschritte, Anlagen, Techniken nicht grundsätzlich immer auch eine Optimierung im Sinne einer Steigerung der Effizienz anstreben sollte. Den spezifischen Aufwand an Energie und Betriebsmitteln und die Emissionen bei gleichbleibendem Nutzen d.h. Aufbereitungserfolg zu senken, ist nicht nur aus ökologischer Sicht immer sinnvoll.

Schon heute und damit im Status Quo wäre in vielen Fällen die Technik vorhanden, die Kreislaufwirtschaft von Kunststoffabfällen deutlich zu erhöhen. Es fehlt auch nicht an einem mangelnden Entwicklungsstand der einzelnen Techniken und Verfahren. Sie sind meist – andernorts – auch großmaßstäblich ausreichend erprobt, um sie im Entsorgungsbetrieb einsetzen zu können.

Ansatzpunkte zur Optimierung der Kreislaufwirtschaft für Kunststoffabfälle sind neben der Hebung technischer Potenziale deshalb weiterhin hier zu suchen:

- ▶ Steigerung der Bereitschaft der Hersteller von Kunststoffprodukten, zumindest in Anteilen auf Rezyklate zurückzugreifen. Es gibt derzeit keine objektive Notwendigkeit seitens der Industrie, sich mit dieser Frage ernsthaft zu beschäftigen.
- ▶ Dies gilt noch weit mehr für die Frage des Produktdesigns. Das recyclinggerechte Design eines Produktes / einer Verpackung hat meist einen nur sehr geringen Stellenwert.
- ▶ Das System der Verwertung (Aufbereitung und Einsatz der Rezyklate) muss sich in seiner Ausrichtung und Philosophie deutlich umstellen. Die Abfallverwertung muss sich quasi entgegen der Entsorgungsrichtung der Abfallmassenströme (siehe Grafik) auf die Erfordernisse der Industrie, in diesem Falle die Kunststoff verarbeitende Industrie, ausrichten. Letztendlich gilt es, hochwertige sekundäre Rohstoffe zu produzieren, die möglichst weit den Eigenschaften der klassischen in der Produktion eingesetzten primären Rohstoffe entsprechen sollten, so dass weder an der Produktion noch an den Produkteigenschaften Änderungen vorgenommen werden müssen.
- ▶ Trotzdem lassen sich Vermischungsschäden auch innerhalb derselben Kunststoffsorten durch zueinander nicht kompatible Unterarten, Additive und Füllstoffe nie vermeiden, so dass der Einsatzbereich von Kunststoffrezyklaten in der Praxis auch an Grenzen stößt.
- ▶ Damit wird aber auch deutlich, dass die entscheidende Weichenstellung in der Verbesserung der Qualitäten der Abfallmassen liegt, die den Input in das System der Verwertung der Kunststoffabfälle darstellen. Die technischen Möglichkeiten sind beschränkt, weitere Innovationen in der Sortier- und Aufbereitungstechnik schwierig umzusetzen. Die entscheidenden Weichenstellungen zur Optimierung der Verwertungserfolge liegen in einem Produktdesign für die Vielzahl an Kunststoffprodukten, das deutlich stärker an deren Recyclingfähigkeit ausgerichtet ist sowie in Sammelsystemen, die die Bereitstellung dieser Abfallmassen mit deutlich geringeren Querverschmutzungen und Fehlwurfanteilen ermöglichen. Beide Aspekte waren nicht Gegenstand der Untersuchungen.

Summary

I Objective of the research project

Relevant studies show that the volume of plastic waste from households and industry (post-consumer sector) in the Federal Republic of Germany is rising steadily and already amounts to far more than 5 million Mg/a. These studies also show that the majority of this plastic waste is recycled for energy recovery [Consultic Study 2016, ReSek Study 2017]. By contrast, the high-quality material recycling of plastic waste, which contributes to climate and resource protection by substituting primary plastics, has been stagnating for some time.

With the aim of further expanding the recycling of plastics, this study examines whether and which technical innovation potentials exist in the recycling process and what effect they have on the environment.

The study focuses on the investigation of the plastics recycling industry dealing with post-consumer plastic waste and its process chain links "sorting plants", "plastics processing plants" and "recyclate users".

The main objectives of the research work are as follows:

- ▶ the determination and description of the state of the art in the areas of sorting, material recycling of plastic waste and the use of recycled materials,
- ▶ the analysis of the technical potential for increasing plastics recycling and the use of recycled materials in Germany, as well as
- ▶ the definition of criteria for the evaluation of innovative techniques and technical process steps with regard to their environmental relief potential.

II Determination and description of the state of the art

For better traceability, the areas of sorting, material recycling and the use of recycled materials are considered separately. The "Sorting" section covers all processes used to produce intermediate products from waste mixtures for subsequent plastic-specific processing for material recycling. In the next stage, "material-recycling", these intermediate products are processed into marketable plastic recyclates. From a technical point of view, the "use of recycled materials" area comprises the processes that produce marketable products using the recycled materials. The state of the art described for the respective areas represents a snapshot for the year 2017.

▶ **Sorting of waste mixtures containing plastics:**

Depending on the waste materials used, the sorting plants differ in their procedural design, so that the description of the state of the art is differentiated according to input material. For further characterization of the respective sorting processes, the characteristic values of *Sorting depth*, *Yield*, *Purity*, *Selectivity* as well as *Consumption parameters* and *Emissions into the environment* are supplemented.

- Waste mixtures from the collection of recyclable materials close to households

In practice, systems for sorting mixtures of lightweight packaging (LVP) and recyclable materials (WST) currently generate more than 10 sorting fractions, of which eight fractions alone are attributable to different plastics. By default, plastic articles with a stable shape (typical of packaging) are sorted out. These include trays, bottles and cups made of polypropylene (PP), polyethylene (PE) and polystyrene (PS). At the end of the sorting process there are also fractions of polyethylene terephthalate (PET), films, mixed plastics, a mixture enriched with black, dimensionally stable plastics and large plastic hollow bodies (> 5 litres). The plant technology is correspondingly complex. First, the material stream is crushed and separated into 3 to 5 grain sizes by means of sieve classification. In addition to air separators for film separation and magnetic and eddy current

separators for ferrous and non-ferrous metal separation, about 20 near-infrared units (NIR separators) are used, which detect cardboard and paper as well as the various types of plastics and discharge them from the waste stream. In addition, sensor-supported separation units for sorting black, dimensionally stable plastics are currently being further developed for operational use. Further approaches concern the quantity and quality of sorting plastic films, e.g. by means of a so-called double drum vacuum separator. The quality of the respective sorting fraction from the LVP sorting defines the product specifications of the dual systems. In practice, however, the required purities, especially for the plastic fractions, are generally not achieved due to the high content of impurities.

- Mixed commercial waste, mixed construction and demolition waste, bulky waste

The mechanical treatment of mixed commercial waste, bulky waste and mixed construction and demolition waste is carried out in several stages according to the state of the art [Dehne et al. 2011]. First the waste is pre-shredded and then classified several times by screening and air separation. Magnetic and eddy current separators separate ferrous and non-ferrous metal-containing components from the mixture. NIR separators are also used for sorting wood and paper/cardboard. Manual sorting is also part of the sorting chain. NIR separators for sorting plastics or individual types of plastics are only used in a few plants in practice to date. The process depth is determined to a large extent by the quality requirements of the product customers. The state of the art does not include systems that only include storage, excavator sorting and handling or systems whose sorting process consists solely of ferrous metal separation and manual sorting without prior classification. In comparison to the LVP/WST sorting plants, the process control and system selection for the sorting plants for the mentioned wastes is more individual and less standard.

- End-of-life vehicles incl. shredder light fraction

The treatment of end-of-life vehicles is regulated by the End-of-Life Vehicles Ordinance (Altfahrzeug-Verordnung - AltfahrzeugV) and includes the dismantling of end-of-life vehicles, shredding of the residual car bodies and processing of the shredder residues. Before the residual bodies are handed over to a shredder facility, certain components, substances and materials must be removed and have priority to be reused or recycled (Annex No. 3.2.3.3 End-of-Life Vehicles Ordinance). In practice, the dismantling of large plastic parts (e.g. bumpers, hubcaps and radiator grilles) for material recycling only takes place to a very limited extent (approx. 3 kg per end-of-life vehicle) [UBA BMUB 2016]. The residual car bodies are then shredded in shredder plants, graded according to grain size and separated into three fractions using air classifiers and magnetic separators: shredder scrap, shredder heavy fraction (non-ferrous metals and plastics, etc.) and shredder light fraction (a mixture of plastics, glass, wood and textile residues, etc.). The shredder residues are further processed primarily to increase the metal yield. The complexity of these so-called post-shredder processes ranges from simple screen separation and ferrous metal separation to plants that additionally generate marketable material flows with the aid of eddy current separators and sensor-based technologies. The further separation of plastics from shredder residues has so far played a subordinate role in Germany. Currently, one plant is in operation and another is under construction, which will produce a so-called plastic concentrate for recycling with the aid of well-known sorting technology (e.g. screening, air separation). The plastic-containing residues are currently used for energy recovery.

- Waste electrical and electronic equipment

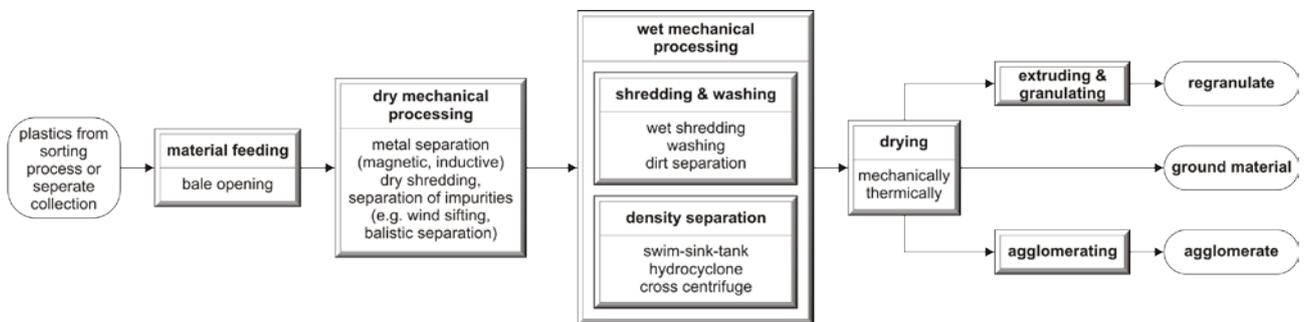
The return and environmentally compatible disposal of Waste of Electrical and Electronic Equipment (WEEE) is regulated by the Electrical and Electronic Equipment Act (ElektroG). In addition, in its amended Communication 31B, the Federal/Land Working Group on Waste (LAGA) specifies the technical requirements for the treatment and recycling of WEEE in accordance with the state of

the art and includes requirements for the handling of plastics (e.g. targeted removal of bromine-free plastics for recycling) [LAGA M31B 2018]. All recorded old electrical equipment (german: Elektronikaltgeräte EAG) must first be subjected to certified primary treatment, which includes testing for reusability of the equipment or individual components as well as removal of pollutants. This is followed by mechanical treatment in order to generate recyclable material flows that are as pure as possible. Depending on the EAG to be treated, the initial treatment and subsequent treatment processes differ in effort and complexity. In practice, the focus of material recovery is predominantly on separating the metals contained as completely as possible. In modern plants, plastics are also sorted out for material recycling. This is currently not being done at a significant rate [Wilts et al. 2016]. The treatment process comprises the partial multi-stage comminution, classification and sorting. Through the use of eddy current and magnetic separators, air separators and NIR separators, ferrous metals, non-ferrous metals and plastics are sorted out as pre-concentrates for further processing.

► **Preparation of pre-sorted plastic fractions (material recycling):**

The plastic intermediate products from the sorting process and the plastic waste collected separately via take-back systems are the starting materials for the production of marketable plastic recyclates (regrind, agglomerate or regranulate). In a combination of dry and wet mechanical process steps, impurities (e.g. paper, metals, glass, sand, foreign plastics) are separated and a plastic product with defined properties is produced. This process represents the state of the art and passes through the essential process steps shown in Figure 1.

Figure 2: Simplified schematic representation of the dry / wet mechanical processing of plastics according to the state of the art



Source: Own representation

Depending on the target polymer, modifications and further process steps may be necessary. For example, the preparation of PET from the disposable bottle collection requires a hot wash for the complete removal of adhesive and beverage residues. In contrast to conventional washing, the washing water is heated and mixed with caustic solution and special detergents. In this study, the processing steps of polyolefins (PE, PP, PE/PP blends), polystyrene (PS), polyethylene terephthalate (PET), polyvinyl chloride (PVC), films, plastics of the shredder light fraction and mixed plastics from LVP sorting are examined in detail. The dry mechanical processing serves to separate loose impurities (e.g. ferrous and non-ferrous metals, paper). The subsequent wet-mechanical treatment partly comprises multi-stage washing and separation processes and serves to remove adhering impurities (e.g. food residues, cosmetic components, labels) and to separate the target plastic. In wet cutting mills and/or friction washers, the ground material is intensively cleaned by friction effects and the supply of water. The recovery of certain types of plastic takes place with the aid of density separation in a wet medium. State-of-the-art technology includes swim-sink tank, hydrocyclones and sorting centrifuges. Following

a drying stage, the ground material is prepared as ground material/flakes or processed into agglomerates or free-flowing regranulates in a final process step, depending on the requirements of the recycle collector.

The mechanical, chemical and thermal properties of recycled plastics are decisive for the use of recycled materials. The property profile is influenced by ageing processes (e.g. due to UV radiation, humidity or temperature), the recycling process itself (mechanical, thermal stress) or so-called mixing damage (imperfect separation processes or compounding of the starting materials). The same standard tests apply to the characterisation of recycled materials as for virgin material [Maier et al. 2016]. The melt flow index, impact strength, elongation at break, yield stress and hardness, among others, serve as reference values.

In plastics recycling plants, water is used for washing processes, wet shredding and density separation of plastics. In order to minimise the use of fresh water, the process water is recirculated as far as possible and cleaned as far as possible of any contamination. Excess water and sludge from wastewater treatment are disposed of externally.

► **State of the art of recycle applications**

Depending on their quality, plastic recyclates can be used in a wide variety of applications. A total of 29 product examples were researched for the construction industry, packaging, household, office supplies, textiles, electrical appliances and vehicles. The data based on manufacturer data and expert surveys provide information about the type of recycled plastic used and the standard processing method. Information on the required recycle quality is not available. This information is sensitive and will not be disclosed for competitive reasons.

The same processes (extrusion, injection moulding) are used for processing plastic recyclates as for primary goods. In addition to the application itself, however, the nature of the recycled material is decisive for the user with regard to the selection and design of the processing technology. This is due to impurities contained in the recycle (e.g. glass splinters, metals, foreign plastics) which can damage the downstream plant technology and lead to defects in the product due to different melting points. Additional upstream filters can clean the melt again and the use of wear-resistant materials can protect individual plant components [VDMA 2017].

III Identification and description of technical potentials

On the basis of this analysis of the state of the art, estimates were made in a second step as to what further potential could be achieved in terms of increasing yield, quality and efficiency in plastics recycling and increasing the proportion of recycled materials through technical and systemic innovations. In detail, the work package comprises the identification of innovative approaches and techniques, an assessment of the associated potentials and the estimation of the resulting environmental benefits and an economic assessment.

The essential basis of the elaborations is the research and evaluation of literature. In addition, the exchange with the practice was sought. The aim was to identify technical potentials and innovations for the German market and for the situation in Germany. In individual cases, this does not exclude the possibility that innovative technical solutions may already be used and tested in other countries. A large part of the available technical literature describes the results of university and non-university research. The gap between these research results and their implementation in practice is sometimes large. The question of their feasibility and their potential for practical application is often unclear, both technically and economically. In particular, neither process parameters nor yields or processing qualities can be transferred from the laboratory to a future production scale.

It should also be noted that there is often a considerable gap between the state of the art and industrial practice. As the elaborations show, the further development of the practice of plastics recycling lies above all in the implementation of the already existing state of the art and probably less in the development of further technical innovations.

The main problem areas in the recycling of plastic waste are:

- **Impurities**

These include e.g. paper, metals, foreign plastics, composites, but also plastics mixed with additives to improve the material properties or various impurities (e.g. product residues in plastic packaging or soil adhesion in agricultural films). Separation and separation is already possible with existing technology. In many cases, however, practical plants do not correspond to the state of the art or an increase in the efficiency and effectiveness of the processes is desirable.

- **Colour sorting**

The colour of plastics is an important property for a variety of applications. Since the colour cannot be removed and, if necessary, over-colouring, and thus darker colours, are possible, colour sorting is very important. In PET recycling, flake sorting has now become established. In the case of other plastics, colour sorting is generally not yet carried out, although the technology is basically available.

- **Odour**

The possible odour pollution is often a decisive criterion against the use of plastic recyclates, especially for packaging, in the automotive sector but also for other products that are to be used in interiors. A reduction in odours is therefore an essential prerequisite for increasing the use of recycled materials in these areas. Various effective washing processes can be used to reduce odours. In practice, this is countered by the effort and costs involved.

- **Contaminations**

Contaminations can prevent or prevent the use of recyclates. This applies in particular to the use in food packaging, but also to the use of waste plastics from electrical appliances and building products, which often contain flame retardants that are no longer allowed. Removing such contamination from plastic fractions (e.g. by solvent processes) can therefore be associated with considerable potential for improving the use of secondary plastics. In practice, however, these solutions have so far not been used, or hardly used at all, for economic reasons. Classical is the endeavour to discharge contaminated plastic fractions instead from the mass flow intended for recycling.

In all steps of plastics recycling - sorting, recycling, use of recycled materials - the problem areas of colour and odour of the recycled materials play a decisive role. There is less lack of innovative technical solutions. Decisive obstacles are investment costs and the necessity to make them more efficient and thus also more economical with regard to the consumption of energy, water and resources.

- ▶ **The identification of innovative approaches and techniques in the field of sorting**

The sorting should be as simple and useful as possible. It should separate plastics contained in a waste stream according to type with the highest possible purity and the lowest possible effort. This objective is confronted with the frequently used composite materials. Detectors usually detect the type of plastic in the top layer. Soot-dyed black plastics cannot be detected by NIR detectors.

However, high-quality recycling of the plastic waste is dependent on clean separation according to type of plastic. In many cases, separation according to the types of plastic for which there are recycling codes is often not sufficient. Additives are problematic because they not only make it difficult to recycle them in the end. Additives (and impurities) can superimpose the properties used for sorting so that

only slightly different types of plastic can no longer be separated cleanly. Against this background, the following technical potentials for improving sorting can be identified:

Use of further detectors

In particular, the separation of (soot-coloured) black plastics is associated with difficulties. One approach is a technical innovation driven by various institutes of the Fraunhofer-Gesellschaft [Bendel 2015]. Other frequencies are used which allow a reliable detection even of optically in-transparent plastics.

In principle, electromagnetic radiation and the different reactions of the irradiated materials can also be used to identify plastics [Langhals et al. 2015]. This identification via the respective characteristic fluorescence should also enable a reliable differentiation into LDPE, HDPE and UHDPE. It should also be possible to separate the PET types or even within silicones.

Another approach is the use of RAMAN spectroscopy. This is followed by irradiation with an exciter radiation of high intensity (UV light to visible light). The light is not absorbed by the material, but scattered. The scattering in the bands and lines typical for the individual plastics is observed and sorted according to this.

For all these approaches, the integration of additional detectors into existing sorting systems is limited due to the additional space required. This and the considerable investment costs for process engineering make these approaches uneconomical so far. There is a considerable discrepancy between the state of the art and the implementation in practice.

Use of markers and digital watermarks

Classically, this refers to the use of fluorescent markers, which can either be inserted into the plastic matrix or applied via imprints and labels. Auto fluorescence and thus the use of the natural fluorescence properties of substances could also be possible. The identification of plastics is possible via fluorescence spectroscopy and thus via basically available technology. The use of labels and imprints is only helpful if the plastics of complete components or packaging are to be identified; the usual sorting of flakes would no longer be possible. If markers are inserted into the plastic matrix, this leads to permanent contamination.

Digital watermarks work with surface structures. Their use is being tested in an ongoing project. The test results have been announced for the end of 2019 [Pioneer Project HolyG-rail].

Sort by shape

Sorting by shape is carried out with the aid of optical systems which sort out certain plastic products known to be made of certain plastics. The principle takes up the old manual sorting method and is already being used in the processing of electrical scrap [Drekopf 2019]. Sorting by shape is conceived as pre-sorting, but cannot simply be integrated into existing systems. However, in combination with downstream sorting by type of plastic, it promises very high sorting qualities.

All in all, it can be stated that there is considerable potential for optimization in sorting, which results from the interaction of several and other detectors, a possible marking of the plastics in the products and the addition of an upstream optical element according to shape to the sorting lines.

► The identification of innovative approaches and techniques in the field of reprocessing

Further processing of the sorting fractions serves the targeted production of recyclates. The aim is to remove a wide variety of impurities and impurities. A further task is also the in-depth sorting. Innovations aim at the achievement of objectives. In addition to improving processing success, the reduction of energy, water and fuel consumption is also a goal here and affects all areas, i.e. shredding, transport but also washing and drying.

Laundry

In order to ensure high-quality recycling and the use of recycled materials equivalent to virgin material, the requirements for odourlessness and colour must be met. Many of the impurities can be removed by washing. The technical development here lies in hot washing (possibly friction cleaning), the use of specifically switched basins and the addition of surfactants. So far, these approaches have only been implemented in a few cases.

Washing involves a considerable use of energy and operating resources. A further effort is to minimize the specific use as much as possible. Another approach is the recirculation of washing water. It will be a question of finding a suitable balance between quality gain and effort.

Separation

After shredding, various separation techniques can be used. Classic is the separation by means of density and here using water. Depending on the density distribution, appropriate additives are added to the separation medium. This approach is always problematic if the specific density of the plastics is changed by the use of fillers (e.g. talcum).

For flake sorting there are new approaches such as the use of lasers to reduce impurities. These are Fourier transform near infrared (FT-NIR) or RAMAN emission spectroscopy detectors. With these approaches, ground plastics can be further separated. So far, these approaches have only been used in a few European plants and are associated with high investments.

The limits of float/sink separation can partly be overcome by flotation, especially foam flotation. The separation can be adjusted more precisely and more sharply, so that a separation of substances of similar density is also possible. In experiments with foam flotation and alkaline pre-treatment under optimum conditions, very good separation of PET from ABS, PS, PC and PVC was achieved. The optimized separation of PVC and PET was also achieved by surface modification with potassium permanganate.

The use of flotation is associated with the use of additional flotation chemicals, water and energy and requires investment in new equipment. This calls into question the economic viability, at least under current conditions. Flotation processes are also in competition with other separation processes such as electrostatic separation. Due to a lack of practical information, it is not possible to weigh the options for action from an economic and ecological point of view.

Identification of innovative approaches and techniques in the field of extruders and injection moulding machines

To remove impurities, melt filters and melt filters with automatic cleaning are already used today in extruders and injection moulding machines. They can be used, for example, to separate metallic admixtures. The separation of unwanted plastics can also be successful if the melting points of the plastics are considerably apart. Current developments in melt filters concern in particular the fineness of the filters. Here, increasingly finer filters are used (so-called laser filters whose fine screen structures are produced with the aid of lasers). In addition, attempts are being made to minimize the energy consumption of extruders and the residence time of the plastics in the extruder in order to reduce the associated thermal stress and degradation of the plastics [plastverarbeiter 2017].

Summary - Potentials of recovery

With regard to the need for better recycling of plastic waste, technical potentials exist through

- Improvement of the cleaning performance of the laundry
- Reduction of energy and water consumption in laundry

- Processing according to requirements with no need for process steps that are not required
- Use of new sorting systems for the separation of ground plastic waste
- Transfer of research results for the application of flotation processes into industrial applications

► **The identification of innovative approaches and techniques in the field of recyclate use**

A wide variety of plastic products can be found in which recycled materials are already being used successfully today. As a rule, however, they originate from particularly pure and clean areas of origin and are used especially in products in which lower demands are placed on colour, odour and strength. The question always arises as to the extent to which recycling rates can be increased in these already common areas as well. However, the following explanations are intended to point out possibilities for expanding the areas of application.

Limitation by contamination

Contaminations such as filling residues, foreign substances or fillers complicate or prevent the use of recycled materials because they impair the properties of secondary plastics. Contacts also include chemical additives that are no longer permitted today or require a closed loop system - e.g. certain flame retardants. For example, closed-loop recycling of pFR PC/ABS from the waste mass flow from the processing of liquid crystal televisions proves to be technically feasible and economically viable under European conditions [Peeters et al. 2014].

RFID tags, which are also widely used in packaging today, can also pose a problem. It is not so much negative influences on the plastics that are to be expected as operating problems (e.g. clogging of sieves). These problems can be reduced by using label materials that are highly compatible with packaging plastics. The operating problem caused by the RFID antenna could be solved technically, e.g. by self-cleaning filters, which are not yet in use everywhere.

Compatibility

Contamination of secondary plastics can often not be completely avoided. One solution may be to increase compatibility and reduce recycling problems by adding additives. A number of compatibilizers are available for this purpose [Pfaender 2016]. It is known that e.g. in electrical appliances High Impact Polystyrene (HIPS), Acrylonitrile butadiene styrene (ABS), polystyrene (PS) and filled polypropylene (PP) can be used. However, these plastics cannot easily be completely separated. An increase in compatibility through additives can help to limit undesirable effects.

In addition to contamination by foreign plastics, other contaminations also occur, the effect of which can be reduced by additives. Metal deactivators improve the thermal stability of metallic contaminants and coupling agents improve the adhesion properties of fillers and reinforcing materials.

Another possibility is micronization (fine grinding) and here the recycling of polymeric multi-component products. This is associated with an additional processing step, which also has a high energy requirement.

Changed product design

Recycling can be significantly influenced by product design. This applies, for example, to the separability and identifiability of plastics. For reasons of environmental and resource protection, recyclability and the use of recycled materials should be given a higher profile in product design.

► **Overview of procedures**

The identified processes aim in particular at improving the quality of the recycled materials. The yield of plastic is generally reduced, as impurities are more effectively treated and thus the total mass is reduced. By improving the quality, however, it may even be possible to increase the proportion of recycled material in the new product or to open up new applications for the use of recycled material.

The processes are often associated with increased energy consumption and are sometimes accompanied by increased consumption of water and resources. The additional energy required for additional detectors is relatively low, whereas the energy required for a hot wash is high. Quantitative data, however, are hardly possible because they depend on a large number of parameters and cannot be given in general terms. The same applies to generally valid statements on improved plant design. The processes should be selected individually with regard to the waste and the products expected or required.

Table: Effects of the measures (++ = significantly more; + = more; o = unchanged; - = less; -- significantly less)

	Measure	Energy consumption	Operating materials	Water consumption	Quality	Yield	Recycled material portion	
Sorting	other detectors	+	o	o	+	- to +	+	
	Use of markers	+	o	o	+	+	+	
	Sorting by shape and material	+	o	o	+	+	+	
Utilization	Hot laundry	++	o	o	+	o	+	
	Use of several basins for laundry	o	o	+	+	o	+	
	Other washing processes (energy and water saving processes)	-	o	-	o	o	o	
	Use of surfactants	o	+	o	+	o	+	
	Laser sorting	+	o	o	+	-	+	
	Flake sorting	+	o	o	+	- to +	+	
	Flotation	+	+	+	+	o	+	
	Better assessment of contaminations	o to +	o	o	+	+	+	
	Use of recycled materials	Compatibilization	o to +	+	o	+	+	+
		Avoidance of connections	+	o	o	o	+	o

IV Ecological Consideration

In this chapter, the state of the art in plastics recycling and the possibilities for developing technical potentials will be addressed and evaluated from an ecological point of view. The evaluation will be

carried out on a comparative basis. The aim is to identify and describe the environmental benefits associated with a technical innovation.

The following work steps are necessary for this purpose:

- Development of the basis for the assessment of the environmental relief potential,
- balancing of innovative techniques
- Evaluation of the optimization of the use of recycled materials

► **Basic principles for assessing the potential for environmental relief**

The research project aims at the analysis of the technical possibilities to increase the recycling of plastics and the recycling of plastics into the economic cycle. However, this analysis is carried out using the example of waste fractions consisting of waste mixtures. Effort and benefit can only be understood if an allocation to the respective plastic components has been carried out. In [Wilts et al. 2016], a study was used to describe the mean composition of mixed construction waste, which lists the respective quantities of processed plastics in the construction sector that could be placed in relation to each other. For **mixed construction waste**, 39% PVC films, 13% other PVC, 20% PE and 8% PP were used. The composition of **mixed commercial waste** was taken from a study for the Federal Environment Agency [Dehne et al. 2015]. According to this study, it mainly consists of 44% LDPE films, 26% PP and 25% PE. For **bulky waste**, hard plastics were used and thus 50% each of HDPE and PP. If electrical and electronic articles as well as vehicles are processed, the plastics accumulate as part of the **shredder light fraction**. ABS, HIPS and PP were mainly used for waste electrical and electronic equipment and PP, ABS and PVC for end-of-life vehicles. Both fractions also contain approx. 22% of other plastics which, such as PUR, are not the subject of the investigation. A great deal of information is available on the composition of the **lightweight packaging**, which could be used as a basis here. 36%, for example, are films made from LDPE, 14% are PP.

For each of the types of waste discussed, the respective burdens associated with recovery are balanced and compared with the associated benefits. The decisive factor in each case is the proportion of each type of plastic that can be recycled and replace primary plastics and the proportion that has to be transferred to energy recovery as inferior. It is assumed that the recycled materials can be used in such a way that the production processes can essentially be maintained. The reference flow in each case is the recycling of 1,000 kg of plastic. Two **scenarios** are distinguished in each case, namely the state of the art and the optimisation potential.

The evaluation is essentially determined by the question of **energy supply**. The required resource for recycling is mainly electricity. The substitution successes associated with energy recovery are also largely determined by energy. A comparison of the state of the art with an optimisation scenario is always associated with a time lag. In the future, however, the supply will take place with a significantly different energy source mix, which was underpinned for 2030 with the climate protection scenario 95 [Reppinger et al. 2015], according to which greenhouse gas emissions can be reduced by 95%. This is primarily achieved through electricity from wind power.

► **Balancing of the innovative techniques and recycling steps**

Sorting

Sorting (and further processing steps) inevitably leaves masses that cannot be assigned to the target fraction. For them, energy recovery in the cement plant (78%) or in a waste incineration plant (22%) is assumed. In the case of PVC, disposal takes place exclusively via a waste incineration plant. Recycling in the cement plant requires processing into substitute fuel.

For **mixed construction waste** and **mixed commercial waste**, it is assumed in the future scenario that 70% of the existing types of plastic can be found in the target fraction, combined with a slightly higher electricity demand. For the status quo, an average rate of 50% was assumed for the types of plastics. The yields are different for the individual plastics; for films, for example, 65% were assumed, for EPS 18%. For **bulky waste**, quotas of 48% each were assumed for HDPE and PP in the status quo and 70% for the future.

It is also assumed for **light packaging** that an optimisation of sorting in the future will enable 70% of the plastics to be transferred to the target fraction. In addition, a sorting fraction of mixed plastics is created, which will then still contain 5% of the masses of each type of plastic. In lightweight packaging, however, plastics are also available as composite materials, 75% of which will end up in a mixed plastics fraction in the future and no longer have to be disposed of primarily as sorting waste.

The plastics in **waste electrical and electronic equipment (WEEE)** and **end-of-life vehicles** are partially pre-sorted as part of manual dismantling prior to processing. In the processing of the shredder residues in post-shredder processes, a mix of plastic types is produced, which is then further separated in the processing and processed into recyclates.

Preparation

The subsequent treatment hardly differs for the different types of waste. It is assumed that the classical sorting fractions do not differ irrespective of their origin from the different types of waste. A yield of 97%, based on dry matter, is assumed in unison. Only for dimensionally stable parts made of PET from the non-packaging sector 90% are assumed, for technical plastics such as ABS 65%. According to the state of the art, recyclates can be produced which can substitute 90% of primary plastics and 10% of which can be used for the production of simple plastic products.

The energy input for processing is comparatively high. For the processing of EPS, for example, it is around 800 kWh/t, and for the processing of films it ranges from 400 kWh/t to 1,100 kWh/t. With the optimisation, the electricity requirement increases again significantly. The use of washing chemicals and soda for flotation are also taken into account.

This significantly higher expenditure is rewarded by the fact that, on the one hand, a yield of 97% is assumed for all plastics and it is assumed that the entire masses can be used as high-quality recyclate and lead to the substitution of primary plastics.

In the processing of light shredder fractions, the yield is significantly lower. Based on the dry substance, 65% is assumed. The remaining masses are used for energy recovery, whereby only ABS, HIPS, PE and PP are considered for material recovery in accordance with the state of the art. Here, too, much greater success can be achieved through optimisation in the future.

The processing of the sorting fraction mixed plastics takes place according to the state of the art for 65% with the aim of producing substitute fuels. The remaining masses are processed into simple products. Optimization is also assumed for this sorting fraction, which results from the use of laser and flake sorting according to colour and air separation. This should limit the proportion that has to be processed into substitute fuels to 50%.

Substitution results

All components that cannot be recycled materially after sorting and processing are used energetically as fuel in the cement plant. Here a substitution of 100% of hard coal is assumed.

Regranulates do not quite reach the qualities and specifications of the granulates on raw material basis. In particular, the substitution factor is not 1:1 for the state of the art. 0.8 has been applied for

plastics and the light shredder fraction, 0.7 for films and 0.6 for mixed plastics as starting material for the state of the art. After optimisation, these ratios change to 0.9 and only remain at 0.7 for materials made of mixed plastics.

In order to map the environmental impacts of the various plastics and thus take into account the substitution successes, the ecoprofiles provided for the Plastics Europe trade association were evaluated. The data sets represent an almost current situation. It was not possible to update the data sets for the future scenario.

► **Increase in plastics recycling from an ecological point of view - accounting results**

On the basis of these considerations and assumptions, recycling routes can be balanced and evaluated for the individual types of accumulation and the plastic components contained, and this separately according to the state of the art and future optimisation (scenarios opt). The presentation is made separately according to the individual environmental impact categories, with the results on the greenhouse effect alone being dealt with here.

For each scenario, the presentation of the results consists of three bars representing the following elements (from left to right):

- Sectoral results of the loads of the preparation process - positive scale bars (system loads)
- Credits for secondary products leaving the system (avoided charges for priority material production) - Negative scale bars (credit notes)
- Net results: Total environmental impact less credits - grey bar Net result

On the burden side, the following sectors are considered:

- Sorting: Energy requirement for the sorting process or the post-shredder processes for the fractions end-of-life vehicles and old electrical appliances (WEEE)
- Material processing: Energy and operating resources required for the processing of plastics sorted in the direction of the target plastic type and the shredder light fraction from end-of-life vehicles and EAG
- Mixed plastic (MKS) processing: Energy and operating resources required for substitute fuel and material processing of the MKS fraction from LVP sorting and energetic recycling of the non-material part in cement works
- Sorting residues energetically: energetic utilization of plastics not sorted out for material processing in waste incineration plants (MVA) and cement works.
- Processing residues energetically: energetic recycling of processing residues in cement works and waste incineration plants

On the credit side, the following subdivision has been made:

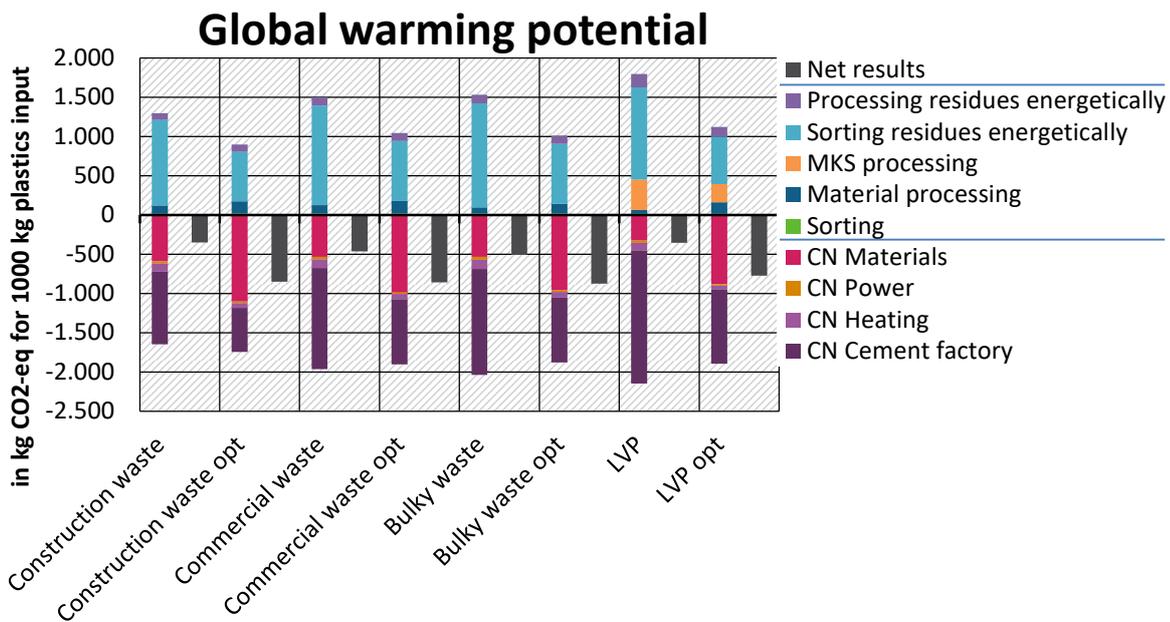
- Credit note (CN) Materials: Avoidance of production loads of substituted primary plastic granulates or wood and concrete products; production loads as applied today
- CN Power: electricity produced in waste incineration plants that substitutes the German electricity mix in 2030
- CN Heating: heat produced in waste incineration plants that substitutes heat from natural gas boilers
- CN Cement factory: Substitution of hard coal by combustion (marginal approach)

All indicator results refer to the processing of 1,000 kg of plastic waste (functional unit).

If one first considers the loads, the great importance of the environmental loads associated with the energy recovery or thermal disposal of treatment residues, but also the sorting residues, becomes apparent. They are significantly higher than those resulting from the use of energy and operating resources for the actual preparation processes for material recycling. Carbon dioxide from fossil sources (petroleum-based plastics) is emitted during the combustion of plastics in waste incineration plants and cement works. The greater proportion of environmental burden caused by the processing of mixed plastics from the recycling of light packaging can also be traced back to this. They are largely processed into substitute fuels and incinerated in cement works.

The loads change in the course of all optimizations. The higher expenditure for sorting and processing is clear, but is limited by the changing energy mix for the year 2030. However, since at the same time considerably fewer masses are used for energy purposes, because the optimization is associated above all with an increase in the material proportion, the resulting loads are significantly lower. "In total", this means significantly lower loads from the recycling systems.

Figure: The recycling of plastics from the point of view of the greenhouse effect



If the substitute fuels are used in cement works and substitute the use of hard coal there, energy recovery is also associated with correspondingly high substitution successes. The resulting credits for all waste streams are clear. Their importance is diminishing parallel to the shift in volume due to the optimization of recycling. This shift in volume towards material recycling is also clearly reflected in the credits for the substitution of primary raw materials. The values calculated for this often almost double. The credit for the provision of energy in cement plants is to be regarded as a maximum estimate due to the marginal approach also applied for the future, according to which hard coal will be substituted there.

"In total" the optimizations are mostly associated with a small reduction of the substitution successes and credits, the effect of the reduced substitution of coal in cement plants outweighs the increase in plastics substitution somewhat.

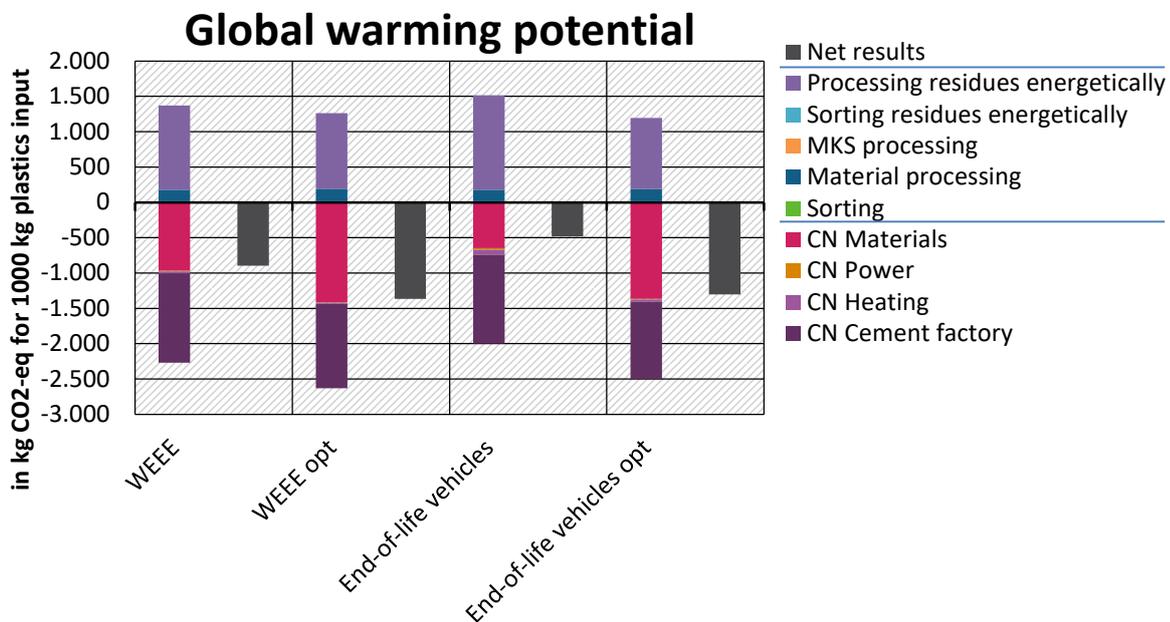
The net results, on the other hand, show a clear improvement of the evaluation results across all waste fractions due to the optimization, because the shift from energetic utilisation, e.g. in cement works,

towards plastic substitution in sum of significantly lower loads and only slightly lower credits enables significant reductions in the greenhouse effect. In net terms, the energetic recycling of plastics in cement plants does not relieve the burden, whereas the recycling of plastics into high-quality recyclates does. The net relief is therefore partly doubled by the optimization.

Through the material recycling of technical plastic types and, above all, PA from waste fractions from old electrical appliances and end-of-life vehicles, primary plastics can be substituted with very high specific production loads, so that greater savings can be achieved through optimisation. "Net", the successes associated with optimization are greater than those that can be achieved from the other waste fractions.

However, this is put into perspective again in terms of quantity, as the quantities of plastic waste from the electrical/electronic and vehicle sectors each account for only 5% of total plastic waste.

Figure: The recycling of light shredder fractions under the aspect of the greenhouse effect



V Conclusion

This study is intended in particular to identify the technical potential for increasing plastics recycling and the use of recycled materials in Germany. These include sorting processes, plastic processing processes and, last but not least, the use of the recycled materials themselves. The optimisation of plastics recycling and thus the increase in the proportion of plastic waste recycled in a high-quality manner is not an end in itself. The optimisation is aimed at reducing the burden on the environment as much as possible. Effort and benefit must therefore be in good proportion to each other.

As was made clear in the study: The technical possibilities currently available in Germany are not being fully exploited. The techniques and processes used in practice for plastics recycling sometimes deviate significantly from the state of the art. In addition, numerous technical approaches have been identified which aim in particular at improving the quality of the recycled materials, as there are still some relevant obstacles to their use in new products. These technical optimisation potentials address both the sorting and processing of used plastics and the use of recycled materials.

As can be seen from the results, the postulated increase in the material recycling of plastic waste is very sensible from an ecological point of view. This is at the expense of quantity and is associated with

an increased consumption of energy, water and, if necessary, operating resources, in particular through the use of additional aggregates. This is always justified in view of the more environmentally friendly production and provision of electrical energy from predominantly renewable sources in the future.

This does not mean that individual process steps, plants and technologies should not always be optimised in order to increase efficiency. To reduce the specific expenditure of energy and resources and the emissions with constant benefit i.e. processing success, is not only sensible from an ecological point of view.

Already today and thus in the status quo, in many cases the technology would be available to significantly increase the cycle economy of plastic waste. There is also no lack of development of the individual techniques and processes. In most cases - elsewhere - they have also been sufficiently tested on a large scale to be used in disposal operations.

Starting points for optimising the recycling economy for plastic waste must therefore continue to be sought here, in addition to increasing technical potential:

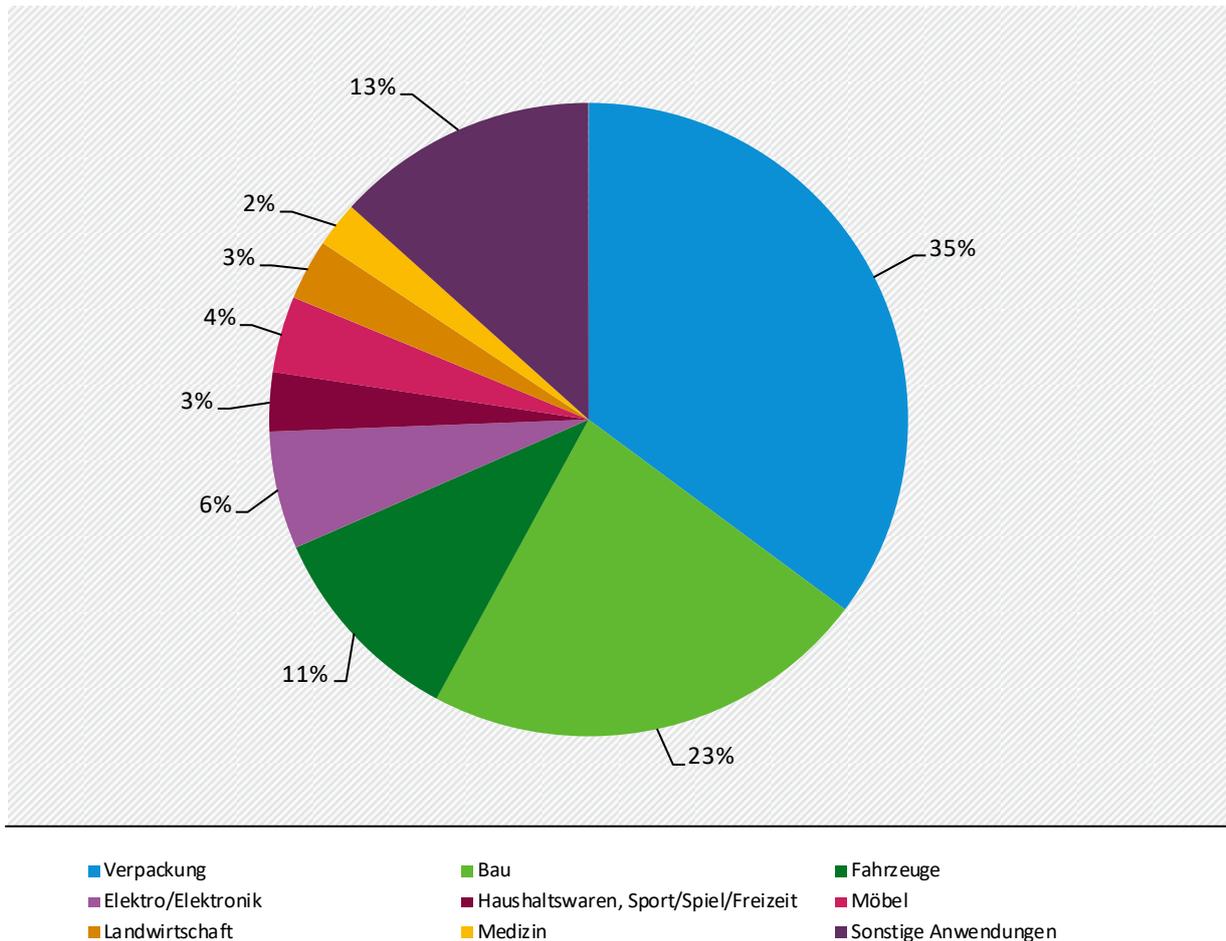
- ▶ Increasing the willingness of manufacturers of plastic products to make use of recycled materials, at least in part. There is currently no objective need on the part of the industry to seriously address this issue.
- ▶ This applies even more to the question of product design. The recyclable design of a product / packaging is usually of very little importance.
- ▶ The system of recycling (processing and use of recycled materials) must change significantly in its orientation and philosophy. The recycling of waste must be oriented towards the requirements of the industry, in this case the plastics processing industry, quasi contrary to the disposal direction of the waste mass flows (see diagram). Ultimately, the aim is to produce high-quality secondary raw materials which should correspond as closely as possible to the properties of the classic primary raw materials used in production, so that neither the production nor the product properties need to be changed.
- ▶ Nevertheless, mixing damage, even within the same types of plastics, can never be avoided by subtypes, additives and fillers that are incompatible with each other, so that the use of recycled plastics also reaches its limits in practice.

However, this also makes it clear that the decisive step is to improve the quality of the waste masses, which represent the input into the system of recycling plastic waste. The technical possibilities are limited, further innovations in the sorting and processing technology are difficult to convert. The decisive steps towards optimising the recycling success are taken in a product design for the large number of plastic products, which is much more oriented towards their recyclability, and in collection systems, which make it possible to provide these waste masses with significantly lower cross contamination and incorrect waste percentages. Both aspects were not the subject of the investigations.

1 Ziel des Forschungsvorhabens

Kunststoffe sind aufgrund ihrer technischen Eigenschaften und des geringen Gewichts weltweit ein vielseitig eingesetzter Werkstoff. Die Hauptanwendungen liegen im Verpackungsbereich, in der Herstellung von Bauprodukten sowie im Fahrzeugsektor (Abbildung 3).

Abbildung 3: Verarbeitete Kunststoffe je Einsatzbereich



Quelle: Eigene Darstellung nach Consultic 2016, Zahlen für Deutschland 2015

Im Abstand von zwei Jahren werden regelmäßig Daten zum Aufkommen und Verbleib von Kunststoffabfällen in Deutschland (Consultic-Studie) erhoben. Gemäß den Angaben dieser Studie hat sich die Kunststoffabfallmenge in der Bundesrepublik Deutschland im Zeitraum der Jahre 1994 bis 2015 von 2,80 Mio. Mg auf 5,92 Mio. Mg bereits mehr als verdoppelt. Der überwiegende Teil - rund 5 Mio. Mg, ca. 85 Ma.-% - entfällt auf die sogenannten Post-Consumer-Abfälle. Das sind die in Haushalten und im Gewerbebereich anfallenden Kunststoffabfälle. Steger et al. 2017 gehen im Rahmen ihrer Studie über die Ressourcenschonung durch eine stoffstromorientierte Sekundärrohstoffwirtschaft (ReSek-Studie 2017) sogar von einem höheren Kunststoffabfallaufkommen aus. Danach sind bereits im Jahr 2013 insgesamt rund 7,3 Mio. Mg Post-Consumer-Kunststoffabfälle angefallen. Unabhängig davon, welche Studie zum Kunststoffabfallaufkommen zugrunde gelegt wird, kommen beide zu dem Ergebnis, dass der Großteil der Kunststoffabfälle nach wie vor energetisch verwertet wird. Eine Gegenüberstellung beider Studienergebnisse zeigt die nachfolgende Tabelle 1.

Tabelle 1: Aufkommen und Entsorgung von Post Consumer-Kunststoffabfällen in Deutschland

Kunststoffabfallaufkommen & -entsorgung (Post Consumer)	Consultic-Studie 2015	ReSek-Studie 2017
Bezugsjahr	2015	2013
Kunststoffabfallaufkommen (Post Consumer)	5,01 Mio. Mg	7,3 Mio. Mg
Stoffliche Verwertung	1,92 Mio. Mg (38,4 Ma.-%)	1,7 Mio. Mg (22,6 Ma.-%)
davon werkstofflich	1,85 Mio. Mg (37,0 Ma.-%)	k.A.
davon rohstofflich	0,07 Mio. Mg (1,4 Ma.-%)	k.A.
Energetische Verwertung	3,05 Mio. Mg (60,8 Ma.-%)	5,5 Mio. Mg (74,7 Ma.-%)
Beseitigung	0,04 Mio. Mg (0,8 Ma.-%)	0,2 Mio. Mg (2,7 Ma.-%)

Quelle: Consultic 2016, Steger et al. 2017

Angesichts der Umweltvorteile einer hochwertigen, auf die Substitution von Primärkunststoffen abzielenden, werkstofflichen Verwertung besteht daher dringender Handlungsbedarf, das Kunststoffrecycling von Abfällen aus dem Post-Consumer-Bereich weiter auszubauen. Mit der vorliegenden Studie soll insbesondere das technische Potenzial für eine Steigerung des Kunststoffrecyclings und des Rezyklateinsatzes identifiziert werden. Dazu wird die gesamte Kunststoffverwertungsbranche – hierzu zählen vorgelagerte Sortierprozesse, Kunststoffaufbereitungsprozesse und nicht zuletzt die Anwender von Kunststoffrezyklaten – stärker in den Fokus genommen.

Wesentliche Teilziele der Forschungsarbeit sind

- ▶ die Ermittlung und Beschreibung des Standes der Technik für die Bereiche Sortierung, werkstoffliche Verwertung von Kunststoffabfällen sowie für den Rezyklateinsatz,
- ▶ die Analyse des technischen Potenzials zur Steigerung des Kunststoffrecyclings und des Rezyklateinsatzes in Deutschland sowie
- ▶ die Festlegung von Kriterien für die Bewertung von innovativen Techniken und technischen Verfahrensschritten bezüglich ihres Umweltentlastungspotenzials.

Die Bearbeitung des Forschungsprojektes erfolgte unter Einbeziehung eines Projektbeirates, dessen Aufgabe es war, das Projekt zu unterstützen und die Projektergebnisse fachlich von externer Seite abzusichern. Der Expertenkreis setzte sich aus Vertretern der Wissenschaft und Wirtschaft zusammen und deckte die Bereiche Sortierung und Aufbereitung von Kunststoffabfällen sowie Anwendung von Kunststoffrezyklaten ab.

Von der Untersuchung ausgenommen sind zukünftige etwaige Änderungen in der Abfallzusammensetzung, die aus der Weiterentwicklung von Kunststoffprodukten (u.a. Materialmix) oder der Umstellung der Sammelsysteme resultieren und Auswirkungen auf das Kunststoffrecycling haben.

2 Ermittlung und Beschreibung des Standes der Technik

Nachfolgend werden die Bereiche Sortierung, werkstoffliche Verwertung und Rezyklateinsatz in Hinblick auf den Stand der Technik untersucht und aus Gründen der besseren Nachvollziehbarkeit getrennt voneinander betrachtet. Um letztlich die Belange der gesamten Prozesskette analysieren zu können, werden bei der Darstellung des Standes der Technik auch die jeweiligen Schnittstellen berücksichtigt. Die drei Bereiche werden wie folgt abgegrenzt:

1. Der Bereich „Sortierung“ beinhaltet alle Verfahren, mit denen aus Abfallgemischen Vorprodukte für eine anschließende kunststoffspezifische Aufbereitung zur werkstofflichen Verwertung erzeugt werden. Hierunter fallen somit beispielsweise Anlagen zur Sortierung von Leichtverpackungen und gemischten Gewerbeabfällen, aber auch Anlagen zur Aufbereitung von Altfahrzeugen oder zur Behandlung von Elektro- und Elektronikaltgeräten. Die Vorprodukte enthalten angereicherte Kunststoffsorten oder Kunststoffgemische.
2. Der Bereich „werkstoffliche Verwertung“ beinhaltet die Aufbereitung der bei der Sortierung gewonnenen Vorprodukte mit dem Zweck, hieraus vermarktungsfähige Kunststoffrezyklate zu erzeugen. Dieser Bereich umfasst ferner die Aufbereitung ausgewählter, über Rücknahmesysteme separat erfasster Kunststoffabfälle (z. B. PET-Flaschen aus dem Pfandsystem, Agrarfolien, Fensterprofile, Rohre).
3. Der Bereich „Rezyklateinsatz“ beinhaltet in technischer Hinsicht die Verfahren, die unter Einsatz der Rezyklate marktfähige Produkte erzeugen. Je nach Produkt (Folien, Flaschen, Eimer, Rohre usw.) werden dazu die auch für Primärkunststoffe entwickelten Fertigungsverfahren wie Spritzgießen, Extrudieren, Blasformen usw. genutzt.

Im Rahmen dieser Studie wird der Status quo der in Deutschland eingesetzten Verfahrenstechnik für die Sortierung und Aufbereitung von Kunststoffabfällen sowie für den Wiedereinsatz von Kunststoffrezyklaten in der Produktion dargestellt. Hierbei handelt es sich um eine Momentaufnahme für das Jahr 2017. Technische Weiterentwicklungen führen zu einer, sofern wirtschaftlich vom Betreiber darstellbar, kontinuierlichen Optimierung der betrachteten Anlagen. Anlagen bzw. Verfahren zu Forschungszwecken oder im Pilotversuch sind nicht Gegenstand dieser Studie.

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass sich der Stand der Praxis, der den Anlagenbestand in Deutschland abbildet, vom Stand der Technik, im Sinne der besten verfügbaren Technik, teilweise deutlich unterscheidet. Beeinflusst durch die Preisentwicklungen am Kunststoffmarkt, aber auch durch rechtliche Vorgaben (Verwertungsquoten) werden die technischen Möglichkeiten in der Praxis bislang nicht in vollem Umfang ausgeschöpft.

2.1 Stand der Technik der Sortierung

Die Sortierung von Abfallgemischen verfolgt das Ziel, vermarktungsfähige Vorprodukte herzustellen. In Abhängigkeit der eingesetzten Abfallmaterialien unterscheiden sich die Sortieranlagen im verfahrenstechnischen Aufbau, sodass die Beschreibung des Standes der Technik differenziert nach Inputmaterial erfolgt. Folgende kunststoffhaltige Abfallgemische sind Gegenstand dieser Studie:

- ▶ Abfallgemische aus der haushaltsnahen Wertstofferrfassung (Gemische aus LVP und stoffgleichen Wertstoffen),
- ▶ gemischte Gewerbeabfälle,
- ▶ gemischte Bau- und Abbruchabfälle sowie
- ▶ Sperrmüll.

Vor dem Hintergrund der vom Gesetzgeber angehobenen Recyclingziele, aber auch aufgrund des Potenzials insbesondere technischer Kunststoffe, gewinnt das Recycling von Kunststoffen aus den Abfallströmen

- ▶ Elektro- und Elektronikaltgeräte,
- ▶ Altfahrzeuge inkl. Schredderleichtfraktion

zunehmend an Bedeutung und ist ebenfalls Bestandteil dieser Studie.

Separat über Rücknahmesysteme erfasste Kunststoffabfälle beispielsweise aus der Landwirtschaft (Agrarfolien) oder dem Baubereich (Fenstern, Rohren sowie Dach- und Dichtungsbahnen) werden in entsprechenden Recyclinganlagen durch verschiedene Sortier- und Waschprozesse direkt zu einem Rezyklat aufbereitet. Abfälle und Anlagen dieser Art finden in Kapitel 2.2 Berücksichtigung.

Im Folgenden geben Fact-Sheets jeweils für die unterschiedlichen Inputströme und die dazugehörigen Anlagen Auskunft über das technische Verfahren sowie zu nachfolgend beschriebenen Kennwerten.

Sortiertiefe:

Die Sortiertiefe beschreibt das Spektrum der in der Anlage erzeugten Kunststoff-Vorprodukte. Das können mit Kunststoffsorten angereicherte Stoffströme dominiert von beispielsweise PE, PP, PS oder PET sein, aber auch Mischfraktionen wie Misch-PET oder Folien.

Ausbeute:

Der Parameter Ausbeute beschreibt den mengenmäßigen Anteil einer Produktfraktion am Gesamt-massenstrom des Zielproduktes im Input der Anlage. Bei der Produktfraktion (Output Sortieranlage) handelt es sich um einen mit dem Zielprodukt angereicherten Stoffstrom, der darüber hinaus auch Anteile an Verunreinigungen wie Papier, Metalle usw. enthält. Sollen hohe Ausbeuten erreicht werden, so geht dies stets zu Lasten der Produktqualität. Daher muss zur Beurteilung eines Aufbereitungsprozesses zusätzlich die Reinheit und Selektivität betrachtet werden. Ein erläuterndes Beispiel zur Berechnung der Kenngrößen Ausbeute, Reinheit und Selektivität ist dem Anhang 1 zu entnehmen.

Reinheit:

Die Reinheit bezeichnet den Anteil des erwünschten Zielproduktes in der Produktfraktion. Das Zielprodukt selbst kann aber ebenfalls aus einem Materialmix bestehen (z. B. PET-Flasche mit PE-Deckel und Sprengring). Bei Untersuchungen in der Praxis wird nur auf das Hauptmaterial (z. B. PET) abgestellt.

Selektivität:

Die Selektivität beschreibt, wie viel vom Ausgangsmaterial tatsächlich in den gewünschten Produktstrom gelangt. Besser als die Ausbeute, die nur ein Mengenverhältnis wiedergibt, ohne die Produktqualität zu berücksichtigen, ist daher die Selektivität eine Kenngröße für den verfahrenstechnischen Wirkungsgrad eines Aufbereitungsprozesses.

Verbrauchskenngrößen:

Bei der Sortierung wird Energie in Form von Strom und Diesel eingesetzt. Entsprechend werden spezifische Kenngrößen ermittelt und beschrieben. Die Kenngrößen werden inputbezogen angegeben.

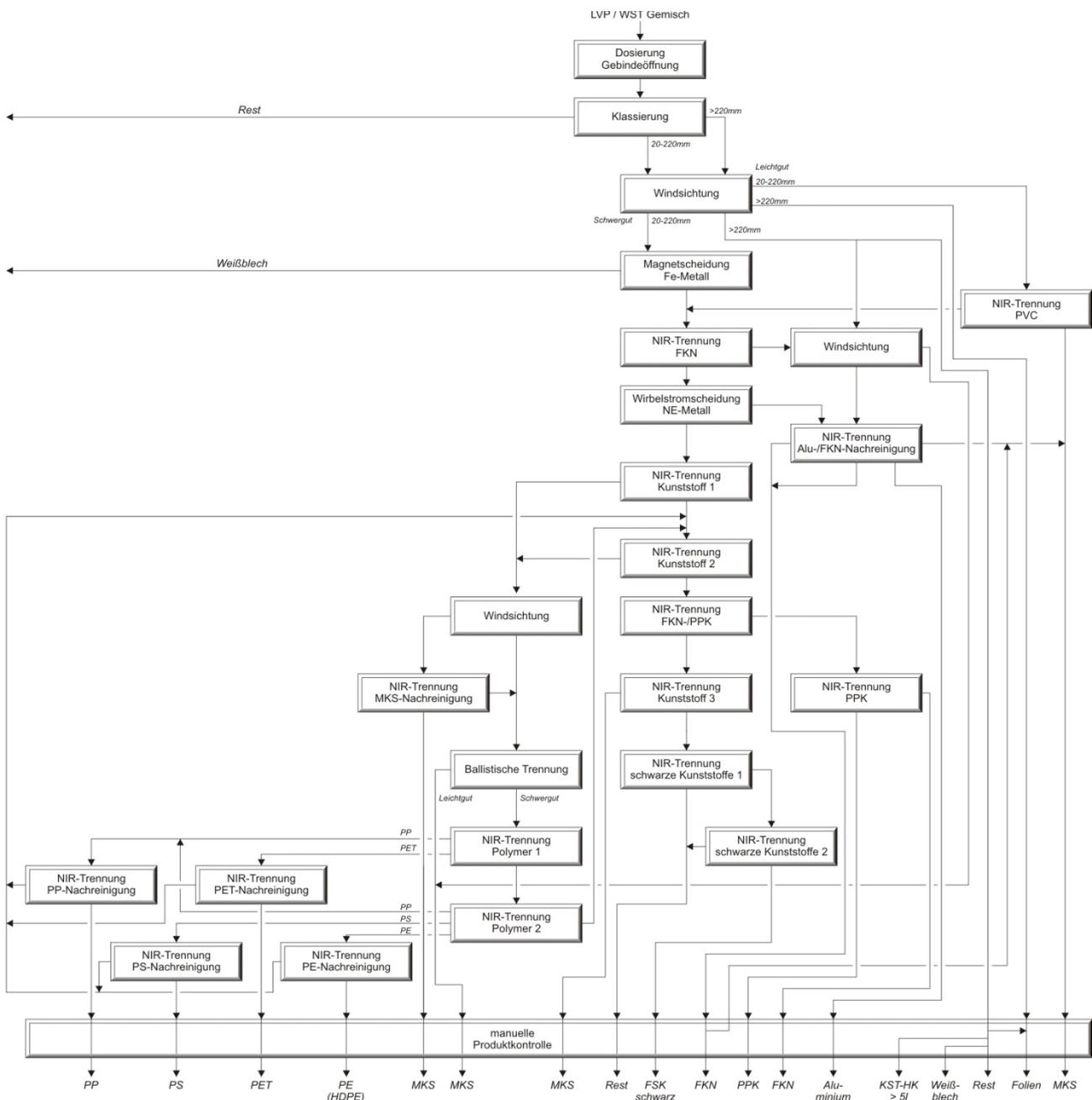
Emissionen in die Umwelt/Umweltbelastung:

Die mit der Sortierung verbundenen Emissionen sind abhängig vom verarbeiteten Material, den eingesetzten Maschinen und dem Layout der betreffenden Anlage.

2.1.1 Sortierung von Abfallgemischen aus der haushaltsnahen Wertstofferrfassung (Gemische aus LVP und anderen Wertstoffen)

Die haushaltsnahe Wertstofferrfassung umfasst ein Gemisch aus Leichtverpackungen (LVP) unterschiedlicher Materialien und in manchen Gebieten zusätzlich auch aus sogenannten stoffgleichen Nichtverpackungen (im Folgenden allgemein als Wertstoffe –WST – bezeichnet). Der Stand der Technik der Sortierung dieser Abfallgemische zur Erzeugung von Kunststoff-Vorprodukten ist in Abbildung 4 schematisch dargestellt. Diesen verfahrenstechnischen Umfang weisen nicht alle bestehenden Anlagen auf, jedoch hat sich aufgrund der bundesweiten Erfassung von LVP und WST-Gemischen und der Anforderungen an die Sortierprodukte bei den Sortieranlagen eine Standardisierung eingestellt [VDI 2095 Blatt 3 Entwurf].

Abbildung 4: Schematische Darstellung einer LVP/WST- Sortierung nach dem Stand der Technik



Quelle: eigene Darstellung

Verfahrensbeschreibung:

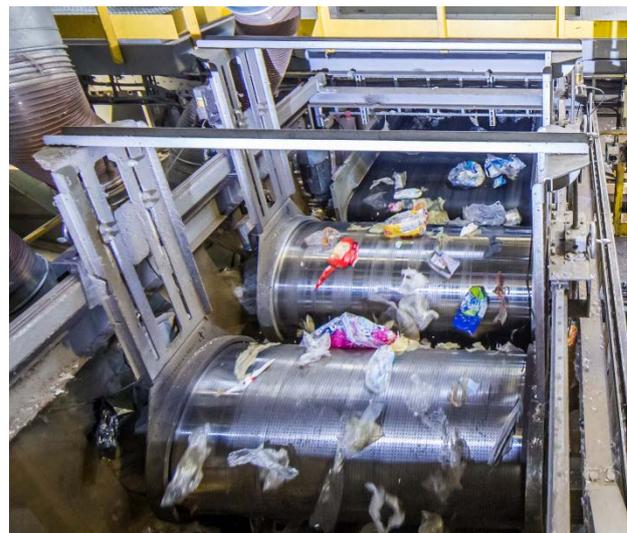
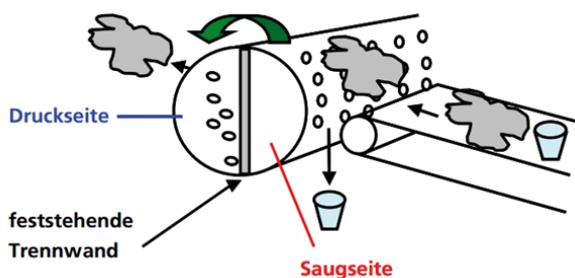
Zur Freilegung der erfassten LVP/WST-Gemische erfolgt als erster Verfahrensschritt eine zweistufige Gebindeöffnung. Hierdurch werden nicht nur die bei der Erfassung der LVP/WST-Gemische verwendeten Sammelsäcke („Gelber Sack“), sondern auch verschlossene Kleingebinde („Müllbeutel“) aufgeschlossen. Alternativ zu den in Reihe geschalteten Gebindeöffnern werden auch langsam laufende Zerkleinerer eingesetzt.

Die anschließende Trennung des LVP/WST-Gemisches in drei bis fünf Korngrößenklassen erfolgt über mehrere Trommelsiebe, die auch für eine Homogenisierung des Volumenstroms sorgen. Hier erfolgt bereits bei einem Trennschnitt von 220 mm eine erste Anreicherung großformatiger Folien im Siebüberlauf. Nachgeschaltete Querstromwindsichter unterstützen diesen Effekt. Die so gewonnene Foliensfraktion wird als separate Outputfraktion bereitgestellt. Die verbleibende Schwerfraktion kann optional manuell nachsortiert werden. Andernfalls wird das Material nachzerkleinert, um es automatischen Sortierprozessen zugänglich zu machen.

Insbesondere großformatige Folien (> 220 mm), die nach der Windsichtung durch Fehlaustrag in der Schwerfraktion landen, können in den weiteren Verfahrensstufen zu Verstopfungen der nachfolgenden Anlagenaggregate führen. In Anlagen, die dem Stand der Technik entsprechen, verfügen die Siebtrommeln über einen sogenannten Umwicklungsschutz. Als Alternative erweist sich der sogenannte Unterdrucktrenner. Im Rahmen des Verbundprojektes „Leichtstoffrecycling“ der Fachhochschule Nordhausen in Zusammenarbeit mit einem Maschinen- und Anlagenbauer im Jahr 2013 wurde der Doppeltrommel-Unterdruck-Trenner (DUDT) erfolgreich getestet [Schade-Dannewitz et al. 2013]. Durch ein frühzeitiges Aussortieren großformatiger Folien wird einer Verstopfung entgegengewirkt und ferner die Folienausbeute und -reinheit verbessert.

Der DUDT besteht aus einer bzw. zwei rotierenden Lochtrommeln, die jeweils über einen dem Abfallstrom zugewandten Unterdruckbereich und einen dem Abfallstrom abgewandten Überdruckbereich verfügen [Schade-Dannewitz et al. 2012]. Im Unterdruckbereich werden flächige Materialien an die Trommel gesaugt und zum Scheitelpunkt mitgeführt. Stückige Materialien werden nicht angesaugt. Hinter dem Scheitelpunkt werden die zuvor angesaugten Materialien mittels Überdruck wieder abgestoßen (Abbildung 5).

Abbildung 5: Funktionsprinzip Doppeltrommel-Unterdruck-Trenner



Quelle: Schade-Dannewitz et al. 2012

© Reclay Holding GmbH

Ein weiterer Siebschnitt erfolgt bei 20 mm. Die sogenannte Feinfraktion wird mittels Schwingsieben abgetrennt. Diese Fraktion ist nahezu wertstofffrei und wird entsorgt.

Das Mittelkorn der LVP/WST-Gemische (20 mm bis 220 mm) bildet mit etwa 80 bis 85 Ma.-% des Inputs den Hauptmassenstrom [Bünemann, Christiani et al. 2011]. Mit Hilfe von Siebtrommeln und Windsichtern erfolgt die weitere Aufbereitung des Mittelkorns. Hierbei steht, insbesondere bei Sortieranlagen mit hohen Kapazitäten, nicht die Gewinnung einer Wertstofffraktion, sondern die Aufsplitzung des Materialstroms auf parallele Linien zur Optimierung nachgeschalteter Sortierprozesse im Fokus. Die Vereinzelung des Materialstroms zu Monoschichten ist für den Einsatz sich anschließender automatischer Sortiertechniken unverzichtbar.

Die Leichtfraktion des Mittelkorns setzt sich aus Kunststofffolien und Altpapier zusammen. Bei zu hohem Papiergehalt ist eine automatische Nachsortierung erforderlich. Die mit Folien angereicherte Leichtfraktion wird als Mischkunststoff ausgetragen. Nach der Abtrennung der dünnwandigen, flächigen Komponenten wird der Materialstrom mittels Überbandmagneten von Eisen (Fe)-Metallen, im Wesentlichen Weißblech, befreit. Eine Nachreinigung der abgetrennten Fraktion ist nicht notwendig. Nichteisen (NE)-Metalle, maßgeblich Aluminium, werden durch den Einsatz von Wirbelstromscheidern abgetrennt. Bei der Wirbelstromscheidung werden auch aluminiumbeschichtete Flüssigkeitskartons fehlausgetragen, sodass eine Nachreinigung des abgetrennten Materials erforderlich ist.

Für die Nachreinigung und Sortierung des Abfallstroms in die unterschiedlichen Materialarten wie Kunststoffe, Papier/ Pappe/ Kartonagen (PPK) sowie Flüssigkeitskartons (FKN) kommen bis zu 20 sensorgestützte Sortieraggregate zum Einsatz [Bünemann, Christiani et al. 2011]. Etabliert hat sich das Verfahren der Nahinfrarotspektroskopie (NIR) zur Identifikation spezifischer Materialeigenschaften. Die auf dem Förderband befindlichen Abfälle werden mit einer Lichtquelle bestrahlt. In Abhängigkeit des Materials wird ein Teil der Wellenlängen absorbiert, ein anderer Teil diffus reflektiert. Hieraus ergibt sich ein materialspezifisches Spektrum, das rechnergestützt mit Referenzwerten abgeglichen wird. Bei einer positiven Erkennung wird das Material durch einen präzisen Druckluftimpuls am Übergabepunkt zum nächsten Förderband aus dem Abfallstrom separiert. Der Trennerfolg ist dabei abhängig vom Grad der Materialvereinzelung. Um Materialüberlagerungen und damit Fehlausträge zu vermeiden, wird der Abfallstrom daher zunächst auf einem Beschleunigungsband vereinzelt.

Die Separierung der Kunststoffe aus dem verbleibenden Abfallstrom erfolgt über mehrere hintereinander geschaltete NIR-Trennstufen unterstützt durch Windsichter und Ballistikseparatoren, die schwere und leichte Kunststoffe voneinander trennen (siehe vorhergehende Abbildung 4). Zunächst werden die Kunststoffe sortenunspezifisch aus dem Abfallstrom separiert. Anschließend erfolgt die Sortierung der formstabilen Kunststoffe standardmäßig in die einzelnen Sorten PP, PE, PET und PS. Für eine bessere Reinheit der Produktfraktionen werden diese abschließend noch einmal einer Nachreinigung unterzogen. Die Reste dieser Nachreinigung werden zur Maximierung der Materialausbeute wieder in den Kreislauf zurückgeführt.

Bei den Produktfraktionen handelt es sich stets um eine mit dem Zielkunststoff angereicherte Fraktion. Im Fall von Materialverbunden oder Verpackungen aus unterschiedlichen Packmitteln (z. B. Kunststoffbecher mit Pappummantelung) erkennt der NIR-Trenner nur das Oberflächenmaterial. Dies führt zwangsläufig zu Verschleppungen anderer Kunststoffsorten oder Materialien in die Produktfraktion.

Die NIR-Technik stößt auch bei schwarzen, mit Ruß eingefärbten Kunststoffen an ihre technischen Grenzen. Schwarze Objekte werden aufgrund der lichtabsorbierenden Wirkung des Rußes nicht erkannt, sodass diese Kunststoffe bislang im Sortierrest verblieben. Am Markt werden bereits spezielle Aggregate angeboten, um auch diese Kunststoffe zu erschließen. Eine bereits teilweise im Anlagenbestand in Deutschland implementierte Technologie beruht auf der sogenannten Hyperspectral-Imaging Technik (HSI-Technik), bei der auf mechanisch bewegte Bauteile verzichtet wird und eine hochauflösende Zeilenkamera die gesamte Breite des Förderbandes scannt. Im Vergleich zur herkömmlichen

NIR-Technik zeichnet sich die HSI-Technik durch eine höhere örtliche als auch spektrale Auflösung aus [Beel 2017]. Bei dem aussortierten Materialstrom handelt es sich um ein Gemisch diverser Kunststoffsorten und ggf. anderer dunkler bzw. schwarzer Objekte. Eine weitergehende Anreicherung einzelner Kunststoffsorten erfolgt in den LVP/WST-Sortieranlagen bislang nicht. Die sortenreine Trennung auf Rußbasis geschwärzter Kunststoffe ist jedoch bereits technisch gelöst. Neben der genannten HSI-Technik, ermöglichen dies die Lasertechnologie und elektrostatische Trennverfahren, die bspw. im Bereich der Aufbereitung von Kunststoffen aus Elektro- und Elektronikaltgeräten Anwendung finden (vgl. Kapitel 2.2.4.6) [Beel 2017, Köhnlechner 2013, Meyer et al. 2017]. Für diese Verfahren müssen die Kunststoffe teilweise als Mahlgut/Flakes vorliegen, also dementsprechend zunächst weiter aufbereitet werden.

Alle maschinell vorsortierten Produktströme durchlaufen abschließend eine manuelle Produktkontrolle. An dieser Stelle werden beispielsweise auch Kunststoffhohlkörper (> 5 Liter) aus der Schwerfraktion größer 220 mm ganz am Anfang des Sortierprozesses händisch aussortiert. Als Alternative zum händischen Nachsortieren sind Sortierroboter Bestandteil neuester Sortieranlagen. Die Sortieraufgabe umfasst bspw. die Entnahme von Silikonkartuschen aus dem PE-Produktstrom. Die Roboterarme können mittels Druckluft ein Gewicht von bis zu 20 kg heben und erreichen eine Frequenz von bis zu 2.000 Zugriffen je Stunde und Arm [Brunn 2017]. Damit sind die Sortierroboter im Vergleich zur herkömmlichen manuellen Sortierung deutlich effizienter.

Zusammenfassend umfasst die technische Ausstattung einer LVP/WST-Sortieranlage, die gemäß dem Stand der Technik betrieben wird, folgende Komponenten:

- a) Vorzerkleinerer, Gebindeöffner und Dosiermaschinen für die Konditionierung des Inputmaterials,
- b) Trommelsiebe und Schwingsiebe für die Klassierung in drei bis fünf Korngrößen,
- c) Magnetscheider, Wirbelstromscheider, Windsichter, sensorgestützte Sortiersysteme, manuelle Klaubung und Ballistikseparatoren für die Sortierung in unterschiedliche Material- und Kunststofffraktionen.

Sortiertiefe:

Die Sortierung der LVP/WST-Gemische nach dem Stand der Technik ermöglicht laut Dehoust; Christiani 2012 heute eine nahezu vollständige Überführung der Wertstoffe in einzelne Fraktionen. Das Sortierverfahren zeichnet sich durch einen hohen Automatisierungsgrad und ein vielfältiges Produktspektrum vor allem hinsichtlich des Materialstroms Kunststoffe aus.

In der Praxis werden derzeit mehr als 10 Sortierfraktionen generiert. Insgesamt acht davon entfallen auf unterschiedliche Kunststofffraktionen. Standardmäßig werden verpackungstypische formstabile Kunststoffartikel aussortiert. Hierzu zählen Schalen, Flaschen und Becher aus PP, PE (HDPE) und PS. Bei der PET-Fraktion handelt es sich um das sogenannte Misch-PET, das aus transparenten PET-Flaschen und anderen formstabilen klaren, farbigen oder opaken PET-Verpackungen besteht. Darüber hinaus liegen am Ende der Sortierung Folien, Mischkunststoffe, ein mit schwarzen formstabilen Kunststoffen angereichertes Gemisch sowie große Kunststoff-Hohlkörper (> 5 Liter) vor. Hierbei handelt es sich je nach Spezifikation um ein Gemisch aus PE-, PP- und ggf. PS- und PET-Verpackungen. Das Sortierspektrum ist bundesweit nicht einheitlich geregelt und wird von den Betreibern der dualen Systeme vorgegeben. Insgesamt umfasst der Katalog der DSD-Spezifikationen aktuell mehr als 20 unterschiedliche Kunststofffraktionen. Einen zusammenfassenden Überblick hierzu zeigt Anhang 2.

Ausbeute:

Bis zu 50 Ma.-% des gesamten LVP/WST-Gemisches entfallen auf die Kunststoffe. Die Gesamtmenge der generierten Produktfraktionen (inkl. Störstoffe) beträgt, bezogen auf den Polymeranteil im Input, mehr als 60 Ma.-%. Damit erreicht die LVP/WST-Sortierung eine vergleichsweise hohe Kunststoffaus-

beute, wengleich das nichts über die Qualität der einzelnen Sortierfraktionen aussagt. Die Ausbeuten einzelner Kunststofffraktionen sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

Tabelle 2: Ausbeuten der sortierten Kunststofffraktionen

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

Quelle: u.e.c. Berlin 2011

Reinheit:

Die qualitativen Merkmale der einzelnen Sortierfraktionen aus der Sortierung von LVP-Gemischen werden durch die Produktspezifikationen der dualen Systeme definiert. Neben der Beschreibung der Zusammensetzung der jeweiligen Sortierfraktion kann hieraus der maximale Störstoffgehalt entnommen werden.

So muss die Folienfraktion für die werkstoffliche Verwertung mindestens DIN A4-Format und eine Reinheit von mindestens 92 Ma.-% aufweisen. Im Rahmen des maximalen Störstoffgehaltes von 8 Ma.-%, dürfen insbesondere sonstige Metall-Artikel, sonstige Kunststoff-Artikel, PPK und sonstige Reststoffe wie Glas, Gummi, Steine, Holz definierte Massenanteile nicht überschreiten.

Sortenreine formstabile Kunststoffartikel aus PP, PE oder PS müssen jeweils einen Reinheitsgrad von 94 Ma.-% inklusive Nebenbestandteilen wie Verschlüssen, Etiketten usw. aufweisen (Produktspezifikationen 324, 329, 331). Neben sonstigen Metall-Artikeln, sortenfremden Kunststoffartikeln und anderen Reststoffen wie Glas, PPK, Verbundmaterialien etc. zählen auch sortengleiche Kunststoffe, die nicht der Spezifikation entsprechen, zu den Störstoffen. Letzteres betrifft insbesondere Folien und Kartuschen für Dichtmassen in der PE- bzw. PP-Fraktion. Für die Mischfraktionen unterschiedlicher Kunststoffsorten werden ebenfalls Reinheiten von bis zu 94 Ma.-% gefordert. Eine Ausnahme bilden die Mischkunststoffe (Produktspezifikationen 350, 352) mit tolerierbaren Störstoffgehalten von 10 bis maximal 15 Ma.-%. Seit dem Jahr 2016 gibt es auch eine Spezifikation für schwarze formstabile Kunststoffe. Der Störstoffgehalt in dieser Fraktion darf maximal 30 Ma.-% betragen.

In der Praxis werden die geforderten Reinheiten jedoch in der Regel nicht erreicht. Bereits im Jahr 2013 wurde seitens der Verwertungsbranche angezeigt, dass der Störstoffanteil in den erzeugten Kunststoff-Vorprodukten massiv angestiegen ist. Im Zeitraum 2011/2012 lag der mittlere Störstoffgehalt der Mischkunststofffraktion bei 15 anstatt 10 Ma.-%. Der Anteil nicht-spezifikationsgerechter Mischkunststoffanlieferungen hatte sich von durchschnittlich 38 % (2005 bis 2010) deutlich auf rund 81 % (2011/2012) erhöht [Textor 2013]. Das Problem erstreckt sich auch auf die sortierten Kunststoffsorten (z. B. PP, PE) sowie auf die Folienware (Tabelle 3).

Tabelle 3: Reinheiten der sortierten Kunststofffraktionen - Soll und Ist

Stoffstrom aus der LVP/WST-Sortierung	Reinheit gemäß DSD-Spezifikation	Reinheit Werte der Praxis
PE-Fraktion	94 Ma.-%	94 Ma.-%
PP-Fraktion	94 Ma.-%	86 Ma.-%
PS-Fraktion	94 Ma.-%	78 Ma.-%
PET-Fraktion	98 Ma.-%	75 Ma.-%
Folien-Fraktion (>DIN A4)	92 Ma.-%	88 Ma.-%

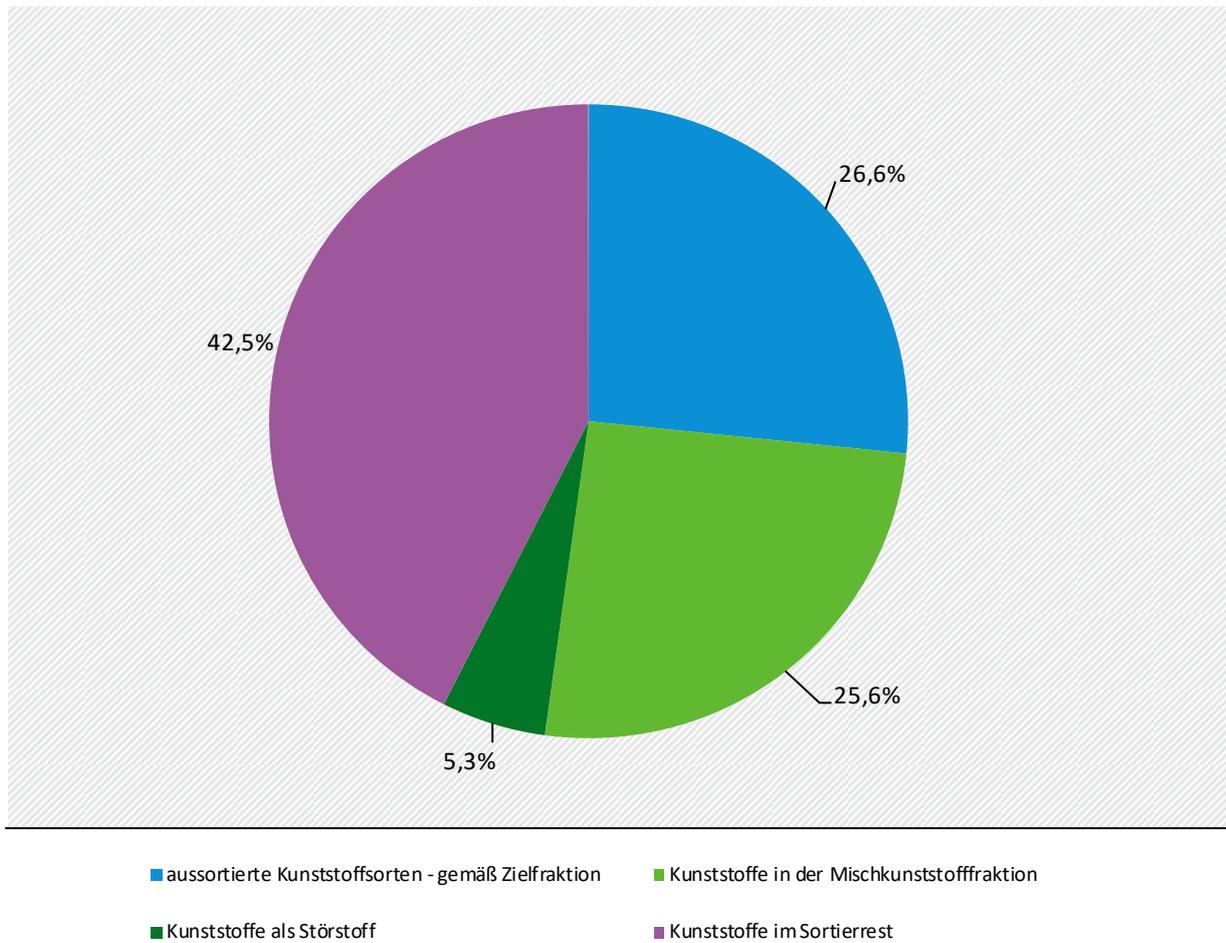
Quelle: u.e.c. Berlin 2011

Das Problem der Qualitäten der Vorprodukte ist, so die Akteure, auf die Missstände im Regime der Verwertungskette der Leichtverpackungen zurückzuführen [Textor 2015, bvse 2015]. Sortieranlagen sind im Auftrag der dualen Systeme tätig, wobei sich die dualen Systeme die Verwertung der Wertstofffraktionen vorbehalten. Die Sortierreste entsorgt der Sortieranlagenbetreiber. Die Reduzierung der Sortierrestmenge und die Erhöhung des Durchsatzes sind für den Anlagenbetreiber somit die einzigen Stellschrauben für einen kostenoptimierten Anlagenbetrieb. Während die Fokussierung auf eine geringe Sortierrestmenge sich im Grundsatz positiv auf die Wertstoffausbeute auswirkt, führt ein erhöhter Mengendurchsatz jedoch zu Bandüberbelegungen und damit insgesamt zu qualitativ schlechteren Sortierergebnissen.

Selektivität:

LVP/WST-Sortieranlagen sind darauf ausgelegt, insbesondere Kunststoffe und andere Wertstoffe aus dem Abfallgemisch zu sortieren. Das Abfallgemisch setzt sich zu 40 bis 50 Ma.-% aus unterschiedlichen Kunststoffen zusammen. Für rund 27 Ma.-% der Kunststoffe erfolgt eine Anreicherung in den jeweiligen Kunststoffproduktfraktionen (PP, PE, PS, PET), rund 26 Ma.-% verlassen die Sortieranlage in der Mischkunststofffraktion, ca. 5 Ma.-% landen als Störstoff in anderen Sortierfraktionen und etwa 43 Ma.-% verbleiben im Sortierrest.

Abbildung 6: Verteilung der Stofffraktion Kunststoffe auf die Outputfraktionen (exemplarisch)



Angaben in Ma.-%

Quelle: u.e.c. Berlin 2011

In der Einzelbetrachtung liefert die Sortierung folgende Ergebnisse bezüglich der Selektivität. Etwa die Hälfte der im Input enthaltenen PE-Abfälle landet in der entsprechenden Zielfraktion. Die PP-Abfälle werden zu rund 42 Ma.-% korrekt aussortiert, PS zu rund 38 Ma.-%. Von den großformatigen Folien landen dagegen nur etwa 29 Ma.-% in der Folienfraktion. PET wird als Misch-PET aussortiert. Etwa 70 Ma.-% der im Sammelgemisch enthaltenen PET-Abfälle landen in dieser Fraktion.

Verbrauchskenngrößen:

Für den Anlagenbetrieb sind Strom und Diesel erforderlich. Der Stromverbrauch für den Betrieb der Aggregate zur Zerkleinerung, Klassierung und Sortierung nebst Fördertechnik beträgt zusammen 60 – 80 kWh/Mg Input. Für die mobile Einsatztechnik (u.a. Radlader) ergibt sich ein Dieselbedarf von etwa 6 kWh/Mg Input (entspricht 0,6 Liter¹ Diesel je Tonne Input).

Emissionen in die Umwelt/Umweltbelastung:

Anlagen gemäß dem Stand der Technik sind von der Anlieferung bis zur Ballierung der Vorprodukte komplett eingehaust. Eine Überdachung oder Einhausung des Outputlagers zum Schutz vor Nässeein-

¹ Bei einer mittleren Dichte des Diesels von 0,83 kg/l und einem mittleren Heizwert für Diesel von rund 11,9 kWh/kg ergibt sich ein Umrechnungsfaktor von rund 9,9 kWh/l [Aral 2010].

trag zählt ebenfalls dazu. Im Zusammenhang mit der Sortierung von LVP/WST-Gemischen spielen Staubemissionen, Gerüche, die Freisetzung von Bioaerosolen, Lärmemissionen und Abwasser aus der Lagerung eine untergeordnete Rolle, in der Praxis können diese jedoch in Einzelfällen relevant sein.

Staubemissionen können bei der Anlieferung und im Eingangslagerbereich auftreten. Da das Inputmaterial aufgrund von Lebensmittelanhaftungen eher feucht und zudem maßgeblich in Säcken und Tüten angeliefert wird, werden Staubemissionen als gering eingeschätzt. Im Inneren der Anlage entstehen Staubemissionen durch mechanische Beanspruchung beim Materialaufschluss sowie bei der Klassierung und Sortierung des Abfallgemisches. Emissionsrelevante Anlagenbereiche oder -teile werden zur Reduzierung der Staubemissionen im Unterdruck betrieben, die Luft wird gefasst, mittels Filter gereinigt und in die Außenluft abgeführt. Ebenfalls staubmindernd wirkt sich die Ausführung der Verkehrsflächen für den Liefer- und Werkverkehr in Straßenbauweise mit einer Decke aus Asphalt oder Beton aus.

Geruchsimmissionen werden durch die Anlieferung und die Behandlung der angelieferten Abfälle in allseits geschlossenen Hallen weitestgehend unterbunden. Als emissionsrelevant gelten teilgeschlossene Lagerbereiche und Hallentore, über die die Geruchsemissionen diffus in die Außenluft gelangen. Im Inneren der Anlage sind die Anlieferung und Anlagenbeschickung, der Maschinenbereich und die Sortierkabine als geruchsbelastete Bereiche zu berücksichtigen. Durch im Unterdruck betriebene Einhausungen der relevanten Anlagenteile werden Geruchsemissionen reduziert. Insgesamt werden die von LVP/WST-Sortieranlagen ausgehenden Gerüche als gering eingeschätzt.

Bioaerosole umfassen unter anderem Bakterien, Viren und Schimmelpilzsporen und können über die gefasste Hallenabluft in die Atmosphäre freigesetzt werden. Bioaerosolbelastete Bereiche sind die Sacköffnung und Zerkleinerung, die Windsichtung und NIR-Trennung, Bandübergabepunkte und die Sortierkabine. Zum Schutz der Beschäftigten sind arbeitsplatzbezogene Minderungsmaßnahmen unter Berücksichtigung der Technischen Regeln für Biologische Arbeitsstoffe (TRBA) erforderlich. Für den Außenbereich der Anlagen liegen mit den Richtlinien VDI 4250 bis 4258 technische Regeln für das Erfassen luftgetragener Mikroorganismen und Viren in der Außenluft sowie zur Minderung von Emissionen von Bioaerosolen und biologischen Agenzien vor. Anlagen, die hinsichtlich der Staub- und Geruchsreduktion nach dem Stand der Technik ausgeführt sind, gelten als unproblematisch in Bezug auf die Bioaerosolemissionen.

Lärmemissionen außerhalb der Sortieranlage werden durch die Einhausung der Maschinenteknik reduziert. Fahrbewegungen durch Radlader und LKW, Beladungs- und Absetzvorgänge im Außenbereich können hingegen relevante Lärmemittenten sein.

Prozessabwässer fallen bei der Sortierung von LVP/WST-Gemischen nicht an, da typischerweise ausschließlich trocken arbeitende Verfahren zum Einsatz kommen. Die Einhausung der Anlage sowie mindestens eine Teilüberdachung der Lagerflächen schützen vor dem Eintrag von Niederschlagswasser.

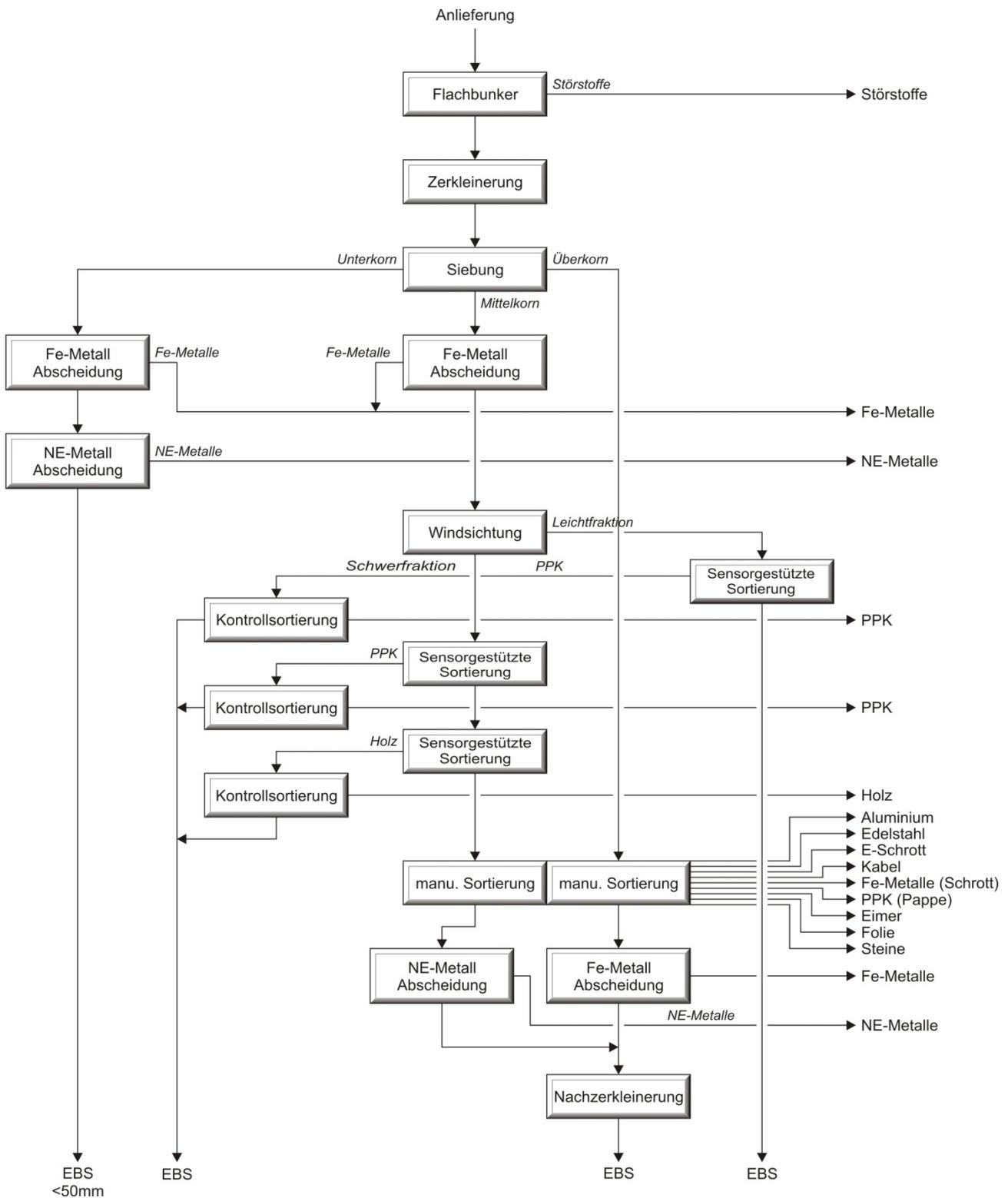
2.1.2 Sortierung von gemischten Gewerbeabfällen, gemischten Bau- und Abbruchabfällen und Sperrmüll

Im Vergleich zu den LVP/WST-Sortieranlagen ist die Prozessführung und Systemauswahl bei den Sortieranlagen für Gewerbeabfälle, Sperrmüll sowie gemischte Bau- und Abbruchabfälle individueller und weniger standardisiert.

Der Stand der Technik der Sortierung ist in Abbildung 7 dargestellt. Der Verfahrensablauf umfasst grundsätzlich die Annahme, Lagerung, Materialaufgabe und Vorbehandlung, die Sortierung/ Materialtrennung und die Aufbereitung der Sortierreste zu Ersatzbrennstoff (EBS) [Dehne et al. 2011]. Die Prozesstiefe wird dabei maßgeblich durch die Qualitätsanforderungen der Produktabnehmer be-

stimmt. Vor dem Hintergrund der Erzeugung hoher Wertstoffausbeuten gelten jedoch Anlagen, die nur eine Lagerung, Baggersortierung und den Umschlag beinhalten oder Anlagen, deren Sortierprozess nur eine Fe-Metallabscheidung und eine manuelle Sortierung ohne vorherige Klassierung beinhaltet, nicht als Stand der Technik.

Abbildung 7: Schematische Darstellung einer Gewerbeabfall- Sortierung nach dem Stand der Technik



Quelle: VDI 2095 Blatt 3 Entwurf

Verfahrensbeschreibung:

Die mechanische Aufbereitung von gemischten Gewerbeabfällen² erfolgt gemäß dem Stand der Technik in mehreren Stufen [Dehne et al. 2011]. Zunächst werden die Abfälle vorzerkleinert und dann durch Siebung und Windsichtung mehrfach klassiert. Magnete und Wirbelstromscheider trennen eisen- und nichteisenmetallhaltige Bestandteile vom Gemisch ab. Darüber hinaus kommen zur Sortierung von Holz und Papier/Pappe NIR-Trenner zum Einsatz. Eine manuelle Sortierung ist ebenfalls Bestandteil der Sortierkette.

Gemischte Gewerbeabfälle sind deutlich heterogener als Wertstoffgemische aus der haushaltnahen Erfassung. Je nach Herkunft der Abfälle unterscheiden sich die Anteile an Metallen, Holz, Kunststoffen, Pappe, Glas oder der mineralischen Fraktion. Um den Aufbereitungsprozess und die Produktion besser steuern zu können, werden unterschiedliche Qualitäten separat eingelagert und dann nach Produktionsplanung bei der Aufgabe zur Verarbeitung gemischt (sogenannte Menüfahrweise). Die eingesetzten Maschinen sind auf diese veränderten Materialeigenschaften angepasst. Zur Vorzerkleinerung kommen beispielsweise Kammwalzenzerkleinerer und Rotorscheren zum Einsatz, für die Nachzerkleinerung werden Einwellenzerkleinerer genutzt. Die Siebausstattung umfasst neben Trommelsieben speziell ausgerüstete Schwingsiebmaschinen sowie Stangensizer und Rollenroste. Darüber hinaus können auch andere Maschinen wie z. B. Koronawalzenscheider, Prallscheider, Rollgut- oder Langteilabscheider zum Einsatz kommen.

Aus Gründen der Betriebssicherheit und des Verschleißschutzes weisen Anlagen nach dem Stand der Technik ferner sogenannte Schwergutfallen auf (häufig ausgeführt als Trommelsichter). Diese kommen vor der Nachzerkleinerung (beispielsweise auf < 25 mm) zum Einsatz und dienen dem Austrag mineralischer Fehlkorneinträge aus der zu zerkleinernden Fraktion.

NIR-Trenner zur Sortierung von Kunststoffen bzw. einzelner Kunststoffsorten werden in der Praxis bislang nur in wenigen Anlagen eingesetzt. Die NIR-Trenntechnik kommt insbesondere dann zum Einsatz, wenn zur Herstellung hochwertiger EBS eine Entnahme von PVC zur Chloranreicherung notwendig ist.

Ebenfalls fester Bestandteil der Gewerbeabfallsortierung ist die manuelle Klaubung. Diese dient sowohl der Sortierung ausgewählter Stofffraktionen (Positiv- oder Negativsortierung) oder spezieller Artikel (z. B. Umreifungsbänder), als auch der Nachreinigung der Vorkonzentrate. Durch eine Vereinzelung des Sortiergutes wird ein hoher Wirkungsgrad bei der Sortierung erreicht. Eingesetzt werden unterschiedlich schnell laufende Bänder, Vibrorinnen oder Rutschen. Die Arbeitsplätze sind einzuhäusen, die Sortierkabine ist als Überdruckkabine mit konditionierter Zuluft unter Beachtung einschlägiger Arbeitsstättenrichtlinien auszuführen. In Anlagen, die vorrangig das Ziel der Herstellung von Ersatzbrennstoffen verfolgen, wird auf die manuelle Klaubung verzichtet.

Zusammenfassend umfasst die technische Ausstattung einer Sortieranlage für gemischte Gewerbeabfälle nach dem Stand der Technik folgende Komponenten:

- a) Vorzerkleinerer und Dosiermaschinen für die Konditionierung des Inputmaterials,
- b) Trommelsiebe und Schwingsiebe für die Klassierung in der Regel in drei Korngrößen,
- c) Magnetscheider, Wirbelstromscheider, Windsichter, sensorgestützte Sortiersysteme, manuelle Klaubung und ballistische Separatoren für die Sortierung in unterschiedliche Materialfraktionen.

² Berücksichtigt im Folgenden auch Sperrmüll und gemischte Bau- und Abbruchabfälle.

Sortiertiefe:

Die Sortierung von gemischten Gewerbeabfällen liefert in der Praxis ein kleineres Produktspektrum als die Sortierung von LVP/WST-Gemischen. Übliche Produkte sind Papier/Pappe/Kartonagen in zum Teil unterschiedlicher Qualität, Holz, Fe- und NE-Metalle, wobei letztere z. T. auch sortenrein manuell nachsortiert werden, sowie Kunststoffe, hierzu zählen überwiegend Folien und großformatige, formstabile Kunststoffe wie z. B. Eimer, Kanister. Bei dem nach der Sortierung verbleibenden Rest handelt es sich entweder um einen Sortierrest zur energetischen Verwertung oder einen konfektionierten Ersatzbrennstoff³, der je nach kalorischen Eigenschaften in EBS-Kraftwerken (mittelkalorische Qualität) oder in der Mitverbrennung (hochkalorische Qualität z. B. in Großkraftwerken und der Zementindustrie) Verwendung findet [Dehne et al. 2011, Dehne et al. 2015].

Ausbeute:

Ausgehend von den Untersuchungen von Dehne et al. 2015 beträgt der Anteil an Vorkonzentraten (Kunststoffe; Holz, Papier/Pappe, Metalle) zum Recycling insgesamt bislang nur rund 14 - 16 Ma.-% bezogen auf den Gesamtinput. Etwa 80 bis 87 Ma.-% des Inputs entfallen auf brennbare Abfälle unterschiedlicher Qualität (Sortierrest/EBS).

Die Ausbeute für die Kunststofffraktion beträgt bezogen auf den im Input enthaltenen Kunststoffanteil rund 11 Ma.-% (inklusive Störstoffe) und ist verglichen mit anderen Wertstofffraktionen am niedrigsten. Die höchsten Ausbeuten mit rund 87 Ma.-% (inputbezogen) werden für die Metallfraktion erreicht.

Die insgesamt niedrige Wertstoffausbeute aus gemischten Gewerbeabfällen kann weder auf ein zu geringes Wertstoffpotenzial, noch auf das Fehlen technischer Möglichkeiten zurückgeführt werden. Gemäß den Recherchen von Dehne et al. 2015 sind vor allem wirtschaftliche Gründe ursächlich. Zur Betriebskostenoptimierung werden teilweise vorhandene Sortierplätze nicht besetzt, Trennaggregate abgeschaltet oder vorhandene Umfahrungen von Aufbereitungsaggregaten genutzt.

Unterstellt, das im Abfall enthaltene Wertstoffpotenzial würde intensiver genutzt werden als es bislang in der Praxis der Fall ist, könnte die Wertstoffausbeute insgesamt auf 40 Ma.-% und die Kunststoffausbeute auf 60 Ma.-% erhöht werden [Dehne et al. 2015]. Hieraus wird deutlich, dass die vom Gesetzgeber in der Gewerbeabfallverordnung festgelegte Recyclingquote in Höhe von 30 Ma.-% (gültig seit 01.01.2019) technisch durchaus gewährleistet werden kann.

Reinheit:

Die meist händisch aussortierten Kunststoffe (Folien und Eimer) liegen in hoher Reinheit vor. Bis zu 97 Ma.-% der Zielfraktion werden korrekt aussortiert [Dehne et al. 2015]. Dem gegenüber weisen beispielsweise die mittels NIR-Trennung erzeugten Folienfraktionen einen Störstoffanteil von im Mittel 18 Ma.-% auf; hauptsächlich PPK.

Auch bei der Gewerbeabfallsortierung bestimmt der Durchsatz die Qualität der Sortierprodukte. Ein hoher Mengendurchsatz führt zur Überbelegung der Sortierbänder, wodurch die notwendige Vereinzelung der Abfälle für die Effizienz nachgeschalteter Sortieraggregate nicht mehr gegeben ist.

Selektivität:

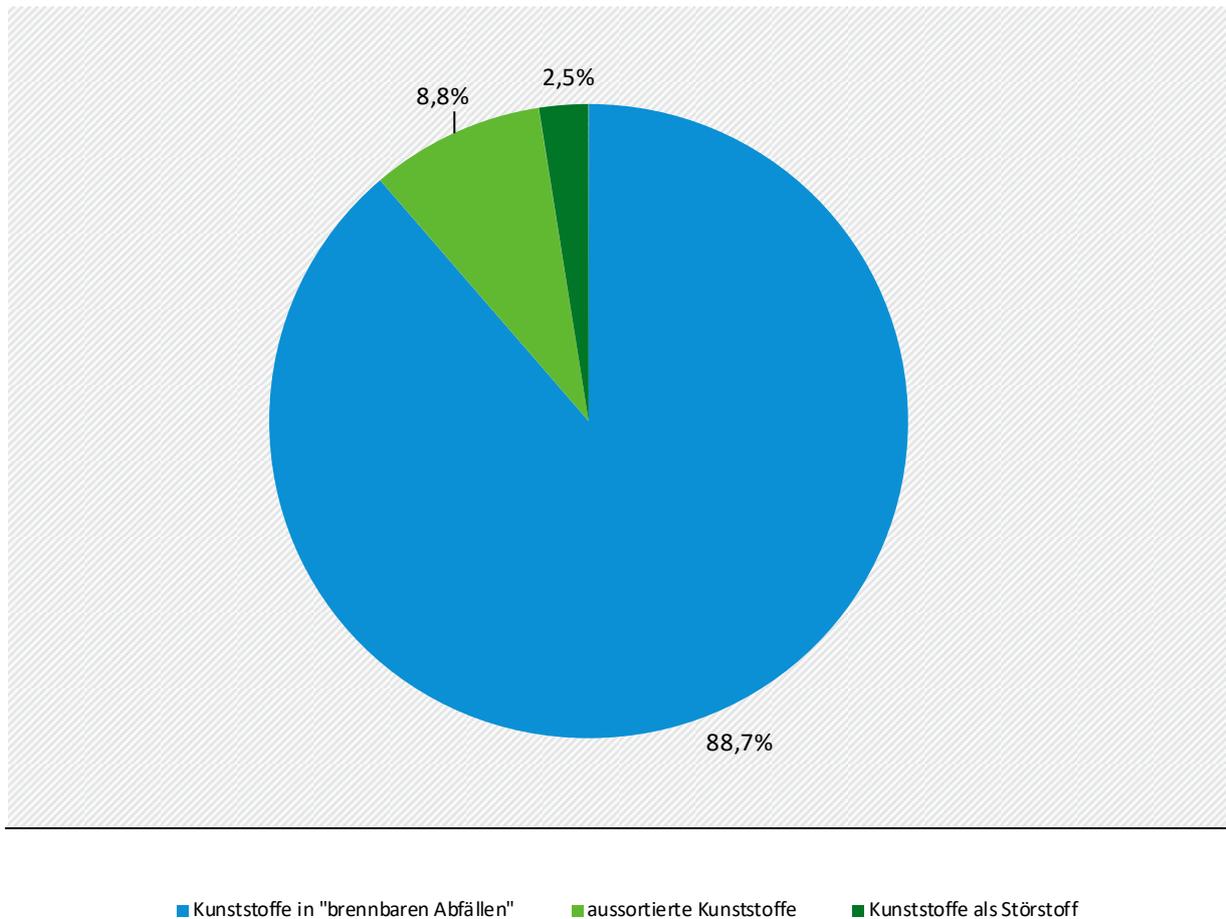
Obwohl in einem Gewerbeabfallgemisch etwa 17 bis 29 Ma.-% auf Kunststoffabfälle entfallen, werden nur insgesamt rund 9 Ma.-% (in der Regel große Folien und formstabile Kunststoffe) aussortiert. Der

³ Die EBS-Aufbereitung ist nicht immer prozessintegriert, sondern erfolgt in entsprechenden Anlagen mit höherem Durchsatz [VDI 2095 Blatt 3 Entwurf].

Großteil der Kunststoffabfälle (ca. 89 Ma.-%) wird als EBS ausgetragen, circa 2 bis 3 Ma.-% landen als Störstoffe in anderen Sortierfraktionen [Dehne et al. 2015].

Der niedrige verfahrenstechnische Wirkungsgrad dieses Aufbereitungsprozesses resultiert aus der in der Praxis vorherrschenden Betriebsführung, die zum einen auf die Erzeugung eines heizwertreichen Produktes und zum anderen auf hohe Durchsätze ausgerichtet ist. Infolge einer intensiveren Wertstoffausbringung ließe sich die Selektivität deutlich steigern; im Fall der Kunststoffe auf etwa 50 Ma.-% [Dehne et al. 2015].

Abbildung 8: Verteilung der Stofffraktion Kunststoffe auf die Outputfraktionen (exemplarisch)



Angaben in Ma.-%

Quelle: Dehne et al. 2015

Verbrauchskenngrößen:

Wesentliche Verbrauchskenngrößen bei der Sortierung von gemischten Gewerbeabfällen sind der Energie- und Dieselaufwand. Im Mittel beträgt der Stromverbrauch rund 60 kWh je Tonne Inputmaterial, der Bedarf an Diesel wird mit rund 6 kWh je Tonne Inputmaterial angegeben [Dehne et al. 2015].

Emissionen in die Umwelt/Umweltbelastung:

Im Vergleich zu LVP/WST-Gemischen sind gemischte Gewerbeabfälle, Sperrmüll sowie gemischte Bau- und Abbruchabfälle deutlich trockener. Daher ist in Sortieranlagen für die Abfallgemische insgesamt mit höheren Staubemissionen zu rechnen. Typische staubbelastete Bereiche sind die Anlieferung, der Bunker, die Verladung, die Förder-, Klassier- und Sortiereinrichtungen sowie das Materiallager und die Verkehrsflächen. Emissionsschwerpunkt sind die Nachzerkleinerungsaggregate für die Erzeugung von EBS.

Das erhöhte Staubaufkommen macht umfangreichere und auf die jeweilige Anlage abgestimmte Staubminderungsmaßnahmen erforderlich. Die staubhaltige Abluft der relevanten Aggregate und der Maschinenhalle(n) wird über ein Rohrleitungssystem einer zentralen Entstaubung zugeführt. Nach TA-Luft darf die gereinigte Abluft bei Einsatz filternder Abscheider (Gewebefilter) eine Staubkonzentration von 10 mg/m^3 nicht überschreiten. Die im Entwurf vorliegende Richtlinie VDI 2095 Blatt 3 weist als Stand der Technik sogar eine Staubkonzentration von maximal 5 mg/m^3 in der gereinigten Abluft aus. Weitere Staubminderungsmaßnahmen umfassen mit Unterdruck betriebene Einhausungen, eine Minimierung der Abwurfhöhen und Nebelungssysteme im Bereich der Hallentore, um diffuse Staubemissionen zu reduzieren. Gemäß dem Stand der Technik werden die Produktfraktionen zu Ballen gepresst und mindestens auf teilgeschlossenen Lagerflächen oder mit Planen abgedeckten Containern gelagert. Die EBS-Verladung/Haldenlagerung erfolgt nach dem Stand der Technik in einem eingehausten Bereich.

Gemäß der Gewerbeabfallverordnung dürfen geruchsrelevante organische Abfälle nicht gemeinsam mit den Gemischen entsorgt werden. Insofern kann von einer vergleichsweise geringen Geruchsbelastung in Sortieranlagen für gemischte Gewerbeabfälle ausgegangen werden. Eine biologische Abluftreinigung ist daher nicht erforderlich. Geruchsminderungsmaßnahmen sind zu ergreifen, wenn große nur teilweise geschlossene Lagerflächen (Ballenlager mit Produktfraktionen) relevante Immissionen hervorrufen.

Anhaftende Bioaerosole werden durch die mechanische Beanspruchung freigesetzt. Typische bioaerosolbelastete Bereiche sind die Beschickung und Zerkleinerung, die Sortiereinrichtungen, Bandübergabepunkte und die Sortierkabine. Es sind die technischen Regeln (TRBA 214) und arbeitsplatzspezifischen Grenzwerte zu beachten (z. B. Lüftungstechnische Maßnahmen gemäß TRBA 214 bei Sortierkabinen).

Das Ausmaß der Lärmemissionen ist abhängig vom Material und den eingesetzten Aggregaten. Lärmemissionen außerhalb der Sortieranlage werden durch eine komplette Einhausung der Maschinenteknik reduziert, so dass in erster Linie die im Freien ablaufenden Tätigkeiten wie das Absetzen von Containern und der Einsatz von Unstetigförderern (u.a. Radlader) als lärmrelevant einzustufen sind.

Prozessabwässer fallen bei der Sortierung von gemischten Gewerbeabfällen nicht an, da typischerweise ausschließlich trocken arbeitende Verfahren zum Einsatz kommen. Eine Überdachung oder Einhausung von Lagerflächen erfolgt für besonders verunreinigte Materialien.

Zusammenfassend umfassen die Emissionsminderungsmaßnahmen nach dem Stand der Technik die Einhausung des Annahmereiches, die Einhausung des Bereiches der Anlagentechnik, die zusätzliche Kapselung von Anlagenteilen oder Teilanlagen, die Hallenabsaugung im Annahmereich, eine gezielte Absaugung von Emissionsquellen, den Einsatz von Bedüsungssystemen und filternden Abscheidern zur Reinigung der gefassten Abluft.

2.1.3 Behandlung von Altfahrzeugen

Im Automobilbau steigt der Einsatz von Kunststoffen seit Jahren kontinuierlich an. Der Anwendungsbereich ist dabei ebenso vielfältig wie die Palette der eingesetzten Kunststoffsorten. Die gebräuchlichsten thermoplastischen Kunststoffe sowie deren Anwendungen in Altfahrzeugen sind in Tabelle 4 aufgezählt (vgl. Tabelle 21, Kapitel 4.1.1). Etwa 9 bis 12 Ma.-% bzw. 150 bis 180 kg des Fahrzeuggewichtes entfallen auf diese Kunststoffe; nahezu die Hälfte davon wird im Innenraum eingesetzt [Mudgal, S. et al. (2011)].

Tabelle 4: Gebräuchliche thermoplastische Kunststoffe in Altfahrzeugen

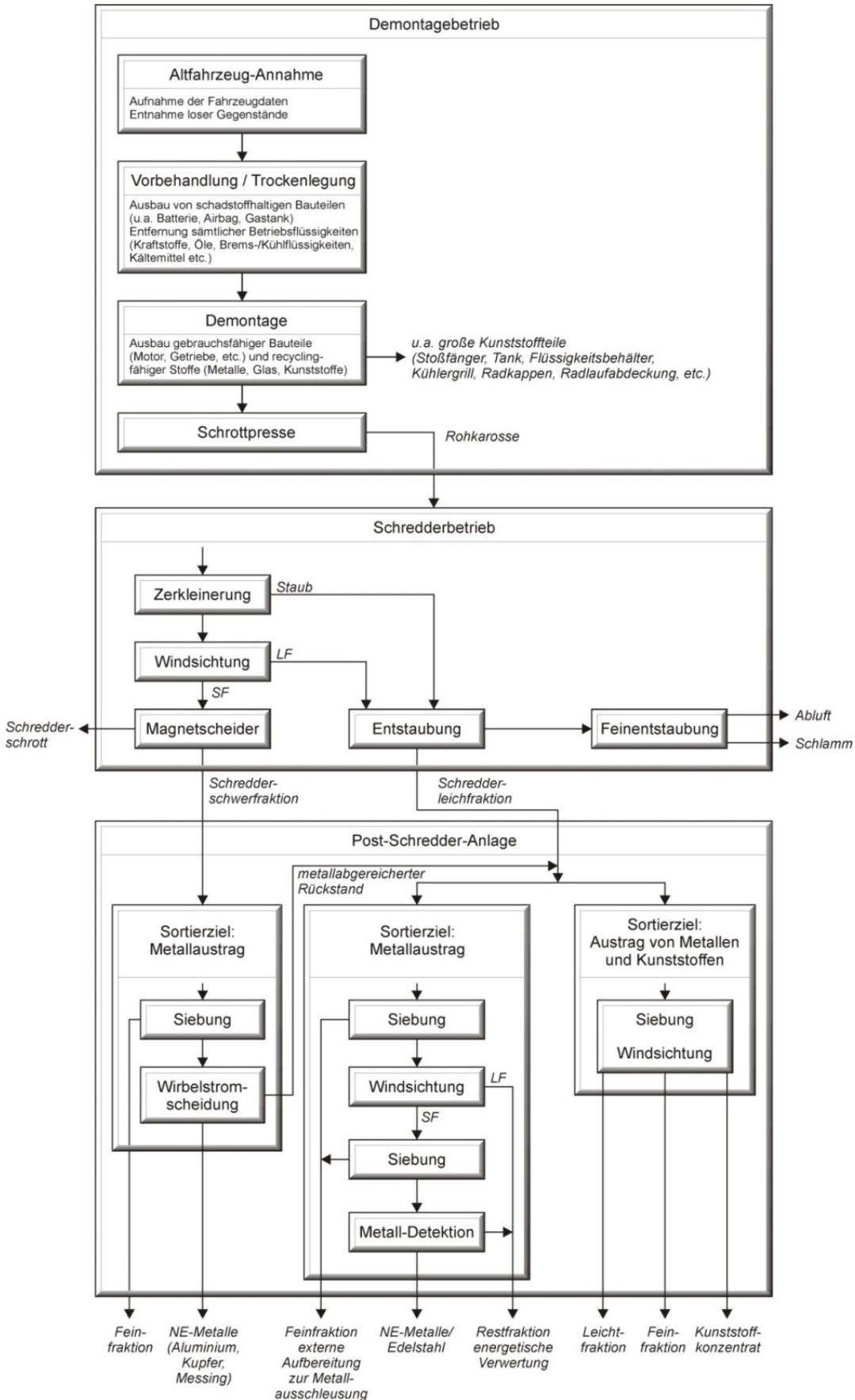
Kunststoff	Anwendungsbeispiele
PP	Stoßfänger, Radhausschalen, Luftfiltergehäuse
ABS	Stoßfänger, Scheinwerfer, Instrumententafel
PVC	Innenverkleidung, Elektrische Bauteile, Polsterung
PA	Motorenabdeckung
HDPE	Kraftstoffbehälter

Quelle: nach Mudgal, S. et al. (2011), Sander et al. 2017

Die Behandlung von Altfahrzeugen erfolgt in drei Schritten und umfasst die Demontage der Altfahrzeuge, das Schreddern der Restkarossen und die Aufbereitung der Schredderrückstände. Eine schematische Darstellung dieser Behandlungsschritte zeigt Abbildung 9. Die Anforderungen an die Annahme und Rücknahme von Altfahrzeugen, an die ordnungsgemäße und schadlose Verwertung von Altfahrzeugen und Restkarossen sowie an die ordnungsgemäße und schadlose Entsorgung der dabei anfallenden Abfälle regelt die Altfahrzeug-Verordnung⁴ (AltfahrzeugV).

⁴ Die AltfahrzeugV basiert auf der europäischen EG-Altfahrzeug-Richtlinie 2000/53/EG und gilt für Fahrzeuge zur Personenbeförderung mit höchstens acht Sitzplätzen außer dem Fahrersitz und Fahrzeuge zur Güterbeförderung mit einem Höchstgewicht bis zu 3,5 Tonnen.

Abbildung 9: Schematische Darstellung der Behandlungsschritte des Altfahrzeug-Recyclings



Quelle: Eigene Darstellung nach BDSV 2012, UBA o.J.

Verfahrensbeschreibung:

In Demontagebetrieben werden zunächst sämtliche Betriebsflüssigkeiten (Kraftstoff, Öle, Kühler-, Bremsflüssigkeiten, Kältemittel etc.) und schadstoffhaltige sowie potenziell explosionsfähige Bauteile (z. B. Airbags) entfernt. Darüber hinaus müssen vor der Überlassung der Restkarosse an eine Schredderanlage bestimmte Bauteile, Stoffe und Materialien entfernt und vorrangig der Wiederverwendung oder der stofflichen Verwertung zugeführt werden (Anhang Nr. 3.2.3.3 AltfahrzeugV). Hierzu zählen u.a. große Kunststoffbauteile wie beispielsweise Stoßfänger, Radkappen und Kühlerschutzgitter, die jedoch wiederum nur dann zu entfernen sind, „wenn die entsprechenden Materialien beim oder nach dem Schreddern nicht in einer Weise getrennt werden, die eine stoffliche Verwertung ermöglicht“ (Anhang Nr. 3.2.3.3 AltfahrzeugV).

Die Demontage noch gebrauchsfähiger Bauteile zum Zweck der Ersatzteilgewinnung erfolgt in der Praxis in Abhängigkeit der Nachfrage. Das bedeutet, dass für die Wiederverwendung geeignete, aber nicht vermarktungsfähige Teile im Fahrzeug verbleiben. Dies betrifft insbesondere Bauteile im Innenraum (u.a. Armaturenbretter und Sitze) [Holzhauer 2015]. Auch der Zustand des Fahrzeuges entscheidet über die Demontagetiefe. So sinkt der Demontageumfang bei älteren Fahrzeugen und Unfallwagen [LUBW 2011].

Die Demontage großer Kunststoffteile zur stofflichen Verwertung erfolgt in der Praxis mit aktuell etwa 3 kg je Altfahrzeug⁵ in nur sehr geringem Umfang [UBA BMUB 2016]. Hierfür sind insbesondere wirtschaftliche Gründe ursächlich. Die Kosten für den Ausbau, die Lagerung und den Transport von leichten, großvolumigen Kunststoffbauteilen stehen aus Sicht vieler Unternehmer in keinem auskömmlichen Verhältnis zum Materialerlös.

In anerkannten Schredderanlagen erfolgt die weitere Behandlung der Restkarossen. Dieser Aufbereitungsschritt dient der Auftrennung der zahlreichen in den Altfahrzeugen enthaltenen Materialien und insbesondere der Abtrennung einer sauberen Metallfraktion. Die Bundesvereinigung Deutscher Stahlrecycling- und Entsorgungsunternehmen e. V. (BDSV) hat den Stand der Technik von Großschredderanlagen im Jahr 2012 dokumentiert [BDSV 2012].

Mit Hilfe einer Förderstrecke und Einzugswalze werden die Restkarossen in das Zerkleinerungsaggregat, den Schredder, transportiert und zerrissen. Durch die Schlag- und Schereffekte lösen sich die Verbunde. Über unten, oben oder seitlich liegende Roste erfolgt eine Klassierung des Materials. Das zerkleinerte Material wird über einen Windsichter geführt und in eine Schwer- und eine Leichtfraktion getrennt. Aus der Schwerfraktion werden mittels Trommelmagneten die Eisenmetalle (der sog. Schredderschrott) aussortiert. Das flugfähige Material (Schredderleichtfraktion) wird zusammen mit der staubbeladenen Abluft aus der Zerkleinerung und der Windsichtung zur Abtrennung von groben Stäuben über eine Entstaubungsanlage geführt. Grober Staub wird in einem Zyklonabscheider durch die einwirkende Fliehkraft abgeschieden, die Schredderleichtfraktion wird ausgetragen. Mittels Venturiwäschern wird die Abluft nachgereinigt [BDSV 2012].

Am Ende des Schredderprozesses liegen drei Fraktionen vor

- ▶ Schredderschrott,
- ▶ eine nichtmagnetische Schredderschwerfraktion, die neben Nichteisenmetallen auch Kunststoffe enthält sowie
- ▶ die Schredderleichtfraktion, ein Gemisch aus Kunststoffen, Glas, Holz, Textilresten sowie Eisen-, Nichteisenmetallen und Feinbestandteilen (Rost, Sand, Staub). In Abhängigkeit von der Zusam-

⁵ Die in Deutschland im Jahr 2014 angefallenen Altfahrzeuge sind im Mittel 14 bis 15 Jahre alt. In diesen Fahrzeugen wurden etwa 120 kg Kunststoffe verbaut [Sander et al. 2017].

mensetzung des Anlageninputs (Altfahrzeuge, Mischschrott, Elektroaltgeräte) beträgt der Kunststoffanteil 28 bis 50 Ma.-% [Wilts et al. 2016].

Die Schredderschwer- und Schredderleichtfraktion werden insbesondere zur Erhöhung der Metallausbeute weiter aufbereitet. Die Komplexität dieser sogenannten Post-Shredder-Verfahren ist sehr unterschiedlich und reicht dabei von einer einfachen Siebtrennung und Eisenmetallabscheidung bis hin zu Anlagen, die zusätzlich mit Hilfe von Wirbelstromscheidern und sensorbasierten Techniken vermarktungsfähige Stoffströme erzeugen. Die Aufbereitung zielt dabei auf eine nahezu vollständige Rückgewinnung von Metallen ab, u.a. Aluminium, Kupfer, Edelstahl. Die verbleibenden kunststoffhaltigen Rückstände dieses Aufbereitungsschrittes werden aktuell maßgeblich energetisch verwertet.

Die weitere Abtrennung von Kunststoffen aus den (metallentfrachteten) Schredderrückständen spielt in Deutschland bislang noch eine untergeordnete Rolle. Derzeit gibt es eine großtechnische Anlage in Leipzig-Espenhain (Kapazität 100.000 t/a), die mittels Klassierung, Siebung und Windsichtung die Schredderleichtfraktion auftrennt in

- ▶ ein sogenanntes Kunststoffkonzentrat zum Recycling,
- ▶ eine Leichtfraktion (u.a. Textilfasern, Schaumstoff, Holz, Folien) zur energetischen Verwertung und
- ▶ eine mineralische Fraktion, die als Deponiebaumaterial verwertet werden kann oder zu beseitigen ist.

Derzeit ist der Bau einer weiteren Anlage zur Rückgewinnung von Kunststoff- und Metallkonzentraten aus vorzerkleinerten Schredderrückständen, insbesondere der Schredderleichtfraktion, geplant [UIP 2017]. Das technische Konzept umfasst Zerkleinerungsaggregate, Siebe, Windsichter, Magnet- und Wirbelstromscheider sowie sensorbasierte Trenntechniken (Kamera, NIR, elektromagnetische Detektion), die Kunststoffe, Platinenstücke und Metalle voneinander trennen. Ferner werden flammhemmende Kunststoffe mit Hilfe der Röntgentechnik aussortiert. Die Anlage zielt auf die Gewinnung von rund 20 % werkstofflich verwertbaren Kunststoffen aus der Schredderleichtfraktion. Die jährliche Verarbeitungskapazität soll maximal 123.600 Tonnen betragen.

Sortiertiefe:

Die großen Kunststoffteile aus der Demontage sind in der Regel Bauteile, die sich bei der Handhabung der Altfahrzeuge gelöst haben, hierzu zählen insbesondere Stoßfänger, Kühlerschutzgitter oder Radkappen. Eine aktive Demontage zum Zweck der Verwertung von beispielsweise auch Radläufen, Kunststofftanks oder Flüssigkeitsbehältern findet in der Praxis nicht bzw. lediglich in geringem Umfang statt. Die Stoßfänger bestehen aus einer Mischung unterschiedlicher Kunststoffsorten, sogenannten Blends z. B. PP/EPDM oder PC/PBT. Kühlerschutzgitter und Radkappen sind ebenfalls aus PP/EPDM oder talkumverstärktem, schlagzähmodifiziertem PP oder PC/ABS gefertigt.

Das Kunststoffkonzentrat aus der Aufbereitung von Schredderrückständen ist ein Gemisch sämtlicher im Fahrzeug verbauter, eingangs erwähnter Kunststoffe.

Die weitere Aufbereitung beider Kunststoffströme zu vermarktungsfähigen Rezyklaten erfolgt im nächsten Schritt durch Kunststoffverwerter (siehe Kapitel 2.2).

Ausbeute:

Im Rahmen der Fahrzeugdemontage wurden im Jahr 2014 rund 3 kg große Kunststoffteile je Fahrzeug repariert. Ausgehend vom Kunststoffanteil eines 13 bis 15 Jahre alten Fahrzeuges entspricht dies etwa 2 bis 4 Ma.-% des Kunststoffpotenzials im Fahrzeug.

Informationen zur Kunststoffausbeute aus der Nachbehandlung von Schredderrückständen sind nicht bekannt.

Reinheit:

Den Kunststoffteilen aus der Demontage haften Fremdstoffe wie Lack, Metalle, Fremdkunststoffe (z. B. Nummernschildhalterung aus ABS am Stoßfänger) und andere Verunreinigungen aus der Nutzungsphase an.

Das Kunststoffgemisch aus der Aufbereitung der Schredderrückstände beinhaltet prozessbedingt Verunreinigungen wie Glas, Metalle. Genaue Angaben zu den Störstoffanteilen sind nicht bekannt.

Selektivität:

Keine Informationen verfügbar.

Verbrauchskenngrößen:

Die Demontage von Kunststoffteilen erfolgt manuell unter Einsatz verschiedenster Werkzeuge und ggf. Hebebühnen. Zu berücksichtigen ist an dieser Stelle der Stromverbrauch der zum Einsatz kommenden Werkzeuge.

Wesentliche Verbrauchskenngrößen beim Schredderprozess und bei der Aufbereitung der Schredderrückstände sind der Energie- und Dieselaufwand. In Ermangelung konkreter Daten können für die weitere Betrachtung der Post-Schredder-Prozesse für den Stromverbrauch der Sortieraggregate und Fördereinrichtungen überschlägig die Verbrauchskennwerte einer Sortieranlage für gemischte Gewerbeabfälle zugrunde gelegt werden (Stromverbrauch rund 60 kWh je Tonne Inputmaterial, Dieselbedarf rund 6 kWh je Tonne Inputmaterial).

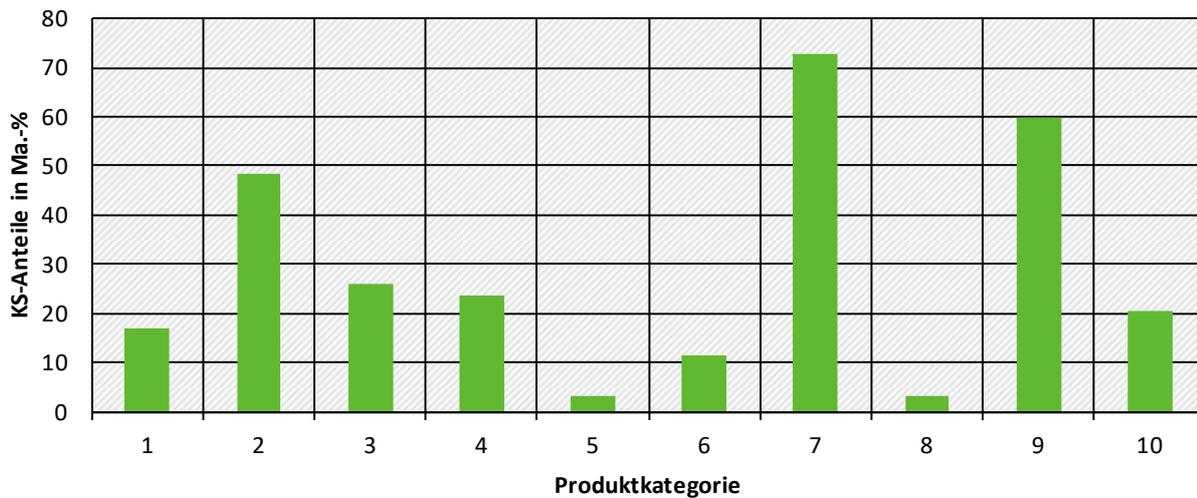
Emissionen in die Umwelt/Umweltbelastung:

Relevante Emissionen bei der Aufbereitung der Schredderrückstände sind Staubemissionen. Typische staubbelastete Bereiche sind die Förder-, Klassier- und Sortiereinrichtungen sowie das Materiallager und die Verkehrsflächen. Emissionsschwerpunkte sind Sieb- und Sichtungaggregate. Gemäß dem Stand der Technik werden emissionsrelevante Anlagenbereiche oder -teile zur Reduzierung der Staubemissionen im Unterdruck betrieben, die Luft wird gefasst, mittels Filter gereinigt und in die Außenluft abgeführt. Die Anlagentechnik ist vollständig eingehaust.

2.1.4 Behandlung von Elektro- und Elektronikgeräten

Die in Elektro- und Elektronikgeräten eingesetzten Kunststoffe umfassen eine große Bandbreite, die von den Kunststoffsorten ABS, PS und PP dominiert wird [Schlummer 2009] (vgl. Tabelle 21, Kapitel 4.1.1). Je nach Gerätekategorie beträgt der Kunststoffanteil zwischen 3 Ma.-% (Beleuchtungskörper) und rund 73 Ma.-% (Spielzeug, Sport- / Freizeitgeräte) [Schlummer 2009]. Einzelheiten sind der Abbildung 10 zu entnehmen.

Abbildung 10: Kunststoffanteil in Elektro- und Elektronikgeräten je Produktkategorie



Produktkategorie			
1 Haushaltsgroßgeräte	4 Unterhaltungselektronik	7 Spielzeug / Sport- / Freizeitgeräte	10 Automatische Ausgabegeräte
2 Haushaltskleingeräte	5 Beleuchtungskörper	8 Medizinische Geräte	
3 IKT-Geräte	6 Elektrische & elektronische Werkzeuge	9 Überwachungs- und Kontrollinstrumente	

Quelle: Eigene Darstellung nach Schlummer 2009

Die Rücknahme und die umweltverträgliche Entsorgung von Elektro- und Elektronikaltgeräten (EAG) regelt das Elektro- und Elektronikgerätegesetz⁶ (ElektroG). Unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Anforderungen an die weitere Behandlung werden EAG aus Haushalten oder ähnlichen Anfallstellen zunächst in sechs Sammelgruppen erfasst (Tabelle 5).

Tabelle 5: Sammelgruppen gemäß § 14 Absatz 1 ElektroG ab 01.12.2018

Sammelgruppen	Bezeichnung
Gruppe 1	Wärmeüberträger
Gruppe 2	Bildschirme, Monitore und Geräte, die Bildschirme mit einer Oberfläche von mehr als 100 Quadratzentimetern enthalten
Gruppe 3	Lampen
Gruppe 4	Großgeräte
Gruppe 5	Kleingeräte und kleine Geräte der Informations- und Telekommunikationstechnik
Gruppe 6	Photovoltaikmodule

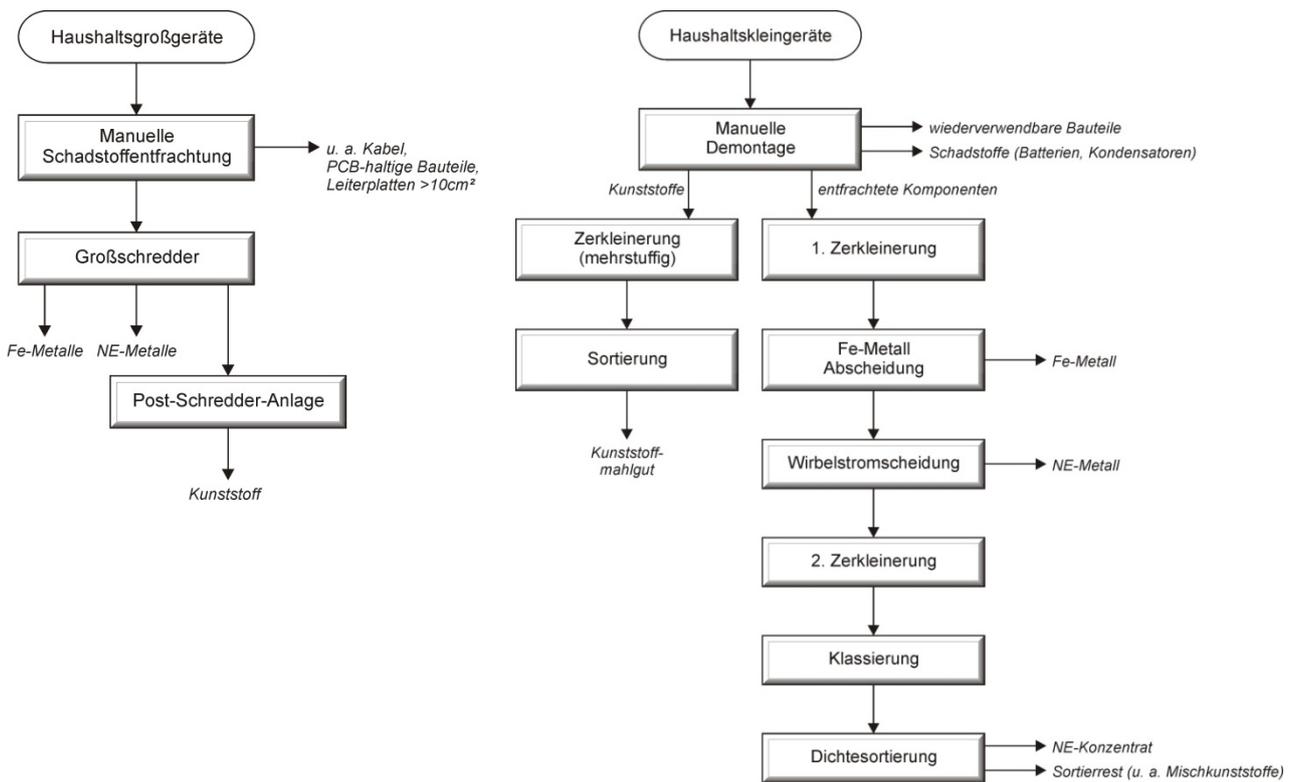
In Abhängigkeit der zu behandelnden EAG unterscheiden sich die Erstbehandlungs- und Aufbereitungsprozesse in Aufwand und Komplexität. Insbesondere Aufbereitungsanlagen für Kühlgeräte verfügen über spezielle Behandlungsstufen wie beispielsweise die Absaugung von Ölen und Kältemitteln wie FCKW oder Pentan. Bildschirmgeräte durchlaufen je nach Bildschirmtechnik (CRT, LCD, LED, Plasma) entsprechend angepasste Aufbereitungslinien. Bei LCD-Flachbildschirmen muss beispielsweise zunächst die hochgiftige, quecksilberhaltige Hintergrundbeleuchtung entnommen werden. Die

⁶ ElektroG - Elektro- und Elektronikgerätegesetz. Gesetz über das Inverkehrbringen, die Rücknahme und die umweltverträgliche Entsorgung von Elektro- und Elektronikgeräten vom 20. Oktober 2015. zuletzt geändert 13.04.2017 S. 872

nachfolgenden Abbildungen geben exemplarisch einen Überblick über die unterschiedlichen Verfahren der Elektroaltgeräteaufbereitung (Abbildung 11, Abbildung 12).

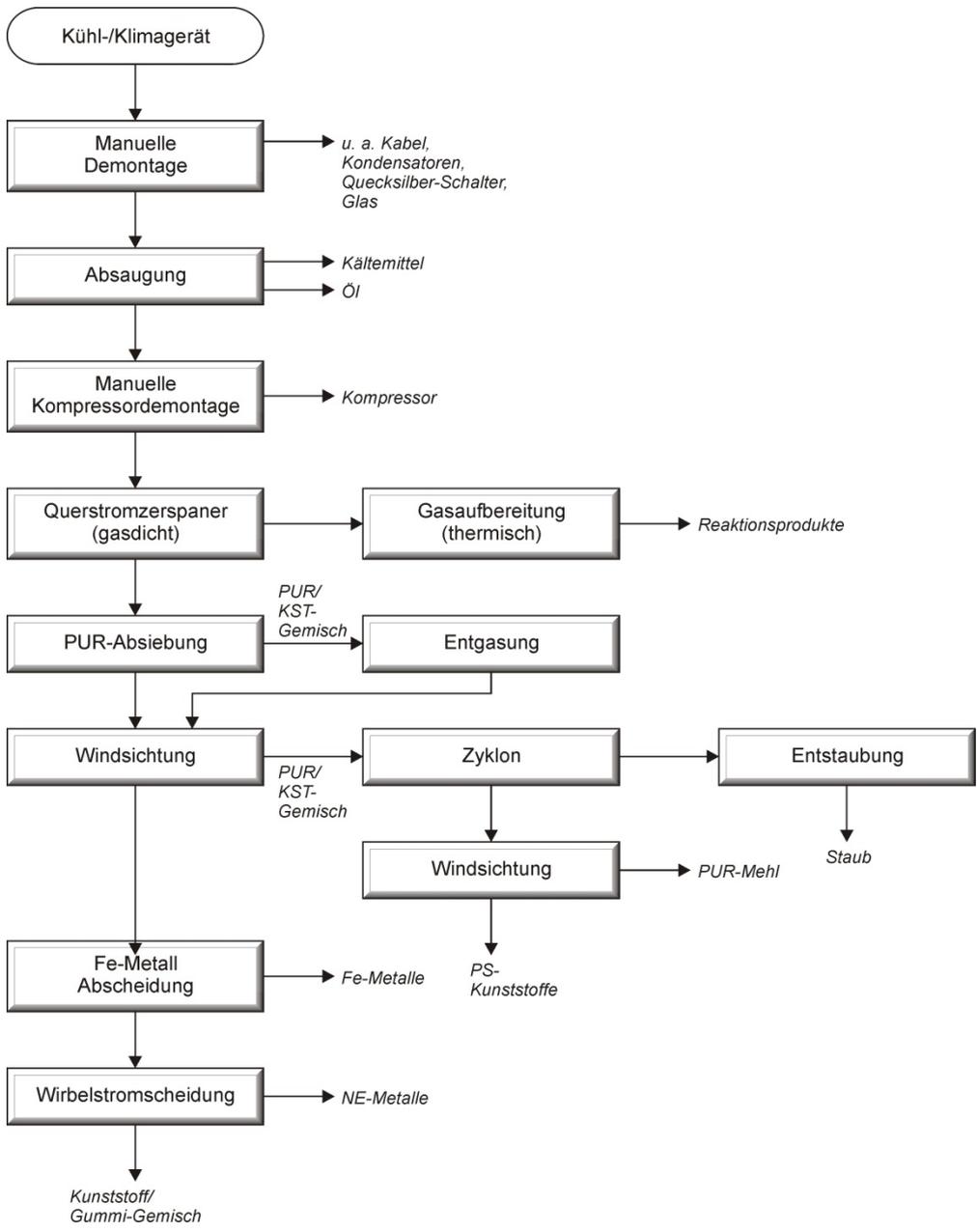
In der Praxis liegt der Fokus der Materialrückgewinnung überwiegend auf einer möglichst vollständigen Separation der enthaltenen Metalle. In modernen Anlagen werden auch Kunststoffe für eine werkstoffliche Verwertung aussortiert. Dies erfolgt aktuell in noch nicht nennenswerter Größenordnung [Wilts et al. 2016]. Hinsichtlich der Zielstellung des Projektes konzentriert sich die nachfolgende Beschreibung auf Verfahren zur Separierung von Kunststoffen. Auf eine detaillierte Beschreibung der je Sammelgruppe unterschiedlichen und teilweise sehr komplexen Aufbereitungsverfahren wird verzichtet und auf [Martens; Goldmann 2016] verwiesen.

Abbildung 11: Schematische Darstellung der Aufbereitung von großen und kleinen Elektroaltgeräten gemäß dem Stand der Technik (exemplarisch)



Quelle: Eigene Darstellung nach Martens; Goldmann 2016

Abbildung 12: Schematische Darstellung der Aufbereitung von Klima- und Kühlgeräten gemäß dem Stand der Technik (exemplarisch)



Quelle: Eigene Darstellung nach Martens; Goldmann 2016

Verfahrensbeschreibungen:

Alle erfassten EAG sind im ersten Schritt einer zertifizierten Erstbehandlung⁷ zuzuführen (§ 20 Absatz 1 Satz 1 ElektroG). Neben der Prüfung auf Wiederverwendbarkeit des Gerätes oder einzelner Bauteile umfasst dies die sogenannte selektive Behandlung (§ 20 Abs. 1, 2 ElektroG). In nahezu allen Altgerätekategorien können schadstoffhaltige Bauteile und Werkstoffe enthalten sein, die zusammen mit allen Flüssigkeiten im Rahmen der selektiven Behandlung aus den Altgeräten zu entfernen sind. Hierzu zäh-

⁷ Der Gesetzgeber versteht unter Erstbehandlung die erste Behandlung von Altgeräten, bei der die Altgeräte zur Wiederverwendung vorbereitet oder von Schadstoffen entfrachtet und Wertstoffe aus den Altgeräten separiert werden.

len auch Kunststoffe, die mit halogenierten Flammenschutzmitteln (FSM) ausgerüstet sind. Dies gilt insbesondere für Kunststoffe mit bromierten FSM (Anlage 4 ElektroG). Bezogen auf den mittleren Kunststoffanteil je Gerät kommen bromierte Kunststoffe maßgeblich in Geräten der Informations-/ Kommunikationstechnik sowie der Unterhaltungselektronik zum Einsatz; typische Anwendungen sind Gehäuse, Kabel sowie Leiterplatten [Schunicht 2013, Wilts et al. 2016]. In der Praxis erfolgt die Entnahme überwiegend basierend auf den Erfahrungswerten und der Fachkunde der Mitarbeiter der Behandlungsanlage. Zur technischen Unterstützung eignen sich mobile Gleitfunkenpektrometer, mit denen halogenierte FSM detektiert werden können. Mit Hilfe eines Gleitfunken wird ein kleiner Teil der Kunststoffoberfläche kurzzeitig verdampft. Die im Material enthaltenen Bestandteile werden ionisiert und zur Aussendung von Licht angeregt. Auf diese Weise werden die charakteristischen Emissionsspektren von Brom und Chlor erfasst und erkannt.

Die Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) hat die Mitteilung 31B im Jahr 2018 novelliert und die technischen Anforderungen an die Behandlung und Verwertung von EAG gemäß dem Stand der Technik konkretisiert [LAGA M31B 2018]. Die Mitteilung umfasst auch Anforderungen an den Umgang mit Kunststoffen und gibt drei Methoden hinsichtlich der Entnahme von Kunststoffen aus den Altgeräten vor:

- Gezielte Entnahme bromfreier Kunststoffe zur stofflichen Verwertung,
- Gezielte Entnahme bromhaltiger Kunststoffe,
- Entfernung sämtlicher Kunststoffe mit und ohne bromierten Flammenschutzmitteln mit anschließender Trennung in bromierte und bromfreie Kunststoffe [LAGA M31B 2018].

Grundsätzlich ist somit für jede Sammelgruppe eine Demontage der EAG als erster Verfahrensschritt erforderlich. Dieser wird i.d.R. manuell durchgeführt und zielt darauf ab, wiederverwendbare Bauteile oder Materialien (Kabel, Leiterplatten, Glas, Kunststoffe) sowie schadstoffhaltige Komponenten (z. B. Batterien, quecksilberhaltige Bauteile, bromierte Kunststoffe) gewissenhaft und unbeschädigt abzutrennen, um eine Kontamination in nachfolgende Aufbereitungsschritte zu vermeiden. Um den Zugriff auf die zu selektierenden Bauteile und Werkstoffe zu erleichtern, werden insbesondere Haushaltskleingeräte zunächst mechanisch mit Hilfe von Ein- oder Zweiwellenzerkleinern langsam und schonend grob aufgeschlossen [Kuchta 2017, Köhnlechner 2014]. Die Entnahme von Schad- und Wertstoffen erfolgt dann wieder manuell am Sortierband. EAG mit werthaltigen Bauteilen, wie Leiterplatten, Metallgehäuse und Kabel – hierzu zählen u.a. Computer, Laptops oder Messgeräte – werden dagegen überwiegend manuell zerlegt [Kuchta 2017].

Hinsichtlich der Aussortierung von Kunststoffen werden bei diesem ersten Behandlungsschritt (Demontage) neben FSM-haltigen Kunststoffen (z. B. Gerätegehäuse/-rückwände), reine Kunststoffkomponenten beispielsweise aus Kühlschränken (z. B. Gemüsefächer, Einlegeböden) und IT-Geräten (z. B. Standfüße von Flachbildschirmgeräten) separiert.

Im Anschluss an die Erstbehandlung erfolgt die weitere mechanische Aufbereitung der schadstoffentfrachteten EAG zur Erzeugung weitestgehend sortenreiner, verwertbarer Materialströme. Dies umfasst die teilweise mehrstufige Zerkleinerung, Klassierung und Sortierung. Der Materialaufschluss erfolgt mit Hilfe von Schreddern, Hammermühlen und Querstromzerspanern. Die Siebklassierung erzeugt definierte Korngrößen des Materials. Durch den Einsatz von Wirbelstrom- und Magnetscheidern, Windsichtern und NIR-Trennern werden Eisenmetalle, Nichteisenmetalle und auch Kunststoffe als Vorkonzentrate für eine weiterführende Aufbereitung (Sortierung / Reinigung) aussortiert.

Sortiertiefe:

Die unterschiedlichen Aufbereitungsverfahren für EAG generieren maßgeblich eine PS-Fraktion aus der Aufbereitung von Kühlschränken (u.a. Gemüseschubladen), Rückwände von TV-Geräten und Monitoren als Gemisch bromhaltiger und bromfreier Kunststoffe sowie ein Kunststoffkonzentrat aus der mechanischen Aufbereitung [Heinen et al. 2018].

Ausbeute:

Informationen zur Kunststoffausbeute liegen nicht vor.

Reinheit:

Händisch demontierte Teile sind ggf. noch mit anderen Werkstoffen verbunden und weisen anhaftende Verunreinigungen aus der Nutzungsphase auf. Das Kunststoffgemisch/-konzentrat aus der mechanischen Aufbereitung beinhaltet prozessbedingt andere Materialien wie Gummi, Holz, Papier, Restmetalle und Glas, aber auch andere Verunreinigungen wie Öle und Fette. Genaue Angaben zu den Störstoffanteilen sind nicht bekannt.

Selektivität:

Nicht ableitbar.

Verbrauchskenngrößen:

Wesentliche Verbrauchskenngrößen bei der Aufbereitung der EAG sind der Energie- und Dieselaufwand. In Ermangelung konkreter Daten können für die weitere Betrachtung für den Stromverbrauch der Sortieraggregate und Fördereinrichtungen überschlägig die Verbrauchskennwerte einer Sortieranlage für gemischte Gewerbeabfälle zugrunde gelegt werden (Stromverbrauch rund 60 kWh je Tonne Inputmaterial, Dieselbedarf rund 6 kWh je Tonne Inputmaterial).

Emissionen in die Umwelt/Umweltbelastung:

Relevante Emissionen bei der Aufbereitung der EAG sind Staubemissionen. Typische staubbelastete Bereiche sind die Förder-, Klassier- und Sortiereinrichtungen. Emissionsschwerpunkte sind Sieb- und Sichtungssysteme. Gemäß dem Stand der Technik werden emissionsrelevante Anlagenbereiche oder -teile zur Reduzierung der Staubemissionen im Unterdruck betrieben, die Luft wird gefasst, mittels Filter gereinigt und in die Außenluft abgeführt. Die Anlagentechnik ist vollständig eingehaust.

2.2 Stand der Technik der werkstofflichen Verwertung

Gegenstand dieses Kapitels sind Anlagen, die aus den Vorprodukten der Sortierung oder separat über Rücknahmesysteme erfassten Kunststoffabfällen vermarktungsfähige Kunststoffrezyklate herstellen. Nachfolgend wird der in Deutschland eingesetzte Stand der Verfahrenstechnik zur Kunststoffaufbereitung beschrieben. Gegenstand dieser Betrachtung sind die Kunststofffraktionen:

- ▶ PE, PP, PE/PP,
- ▶ PVC,
- ▶ PET,
- ▶ PS,
- ▶ Folien,
- ▶ Kunststoffe der Schredderleichtfraktion (schwarze Kunststoffe, technische Kunststoffe aus EAG und Altfahrzeugen) sowie
- ▶ Mischkunststoffe (LVP).

Ergänzend zu der verfahrenstechnischen Beschreibung werden für die unterschiedlichen Inputströme Fact-Sheets erarbeitet, die zusätzlich Auskunft über folgende Kennwerte geben:

Rezyklatausbeute:

Diese Kennziffer beschreibt den Massenanteil des Ziel-Produktes (Output) zum Verfahrensinput. Die Rezyklatausbeute wird durch den Feuchte- und Störstoffgehalt im Input beeinflusst.

Qualität der Rezyklate:

Die Qualität der Rezyklate wird praxisüblich mit Kennwerten der rheologischen (Schmelzflussrate - MFR) und mechanischen Eigenschaften (E-Modul, Zugfestigkeit, Bruchdehnung, Kerbschlagzähigkeit, Shore-Härte) beschrieben. Abgestellt wird auf Kennwerte der Standardprodukte, nicht auf die anwendungsspezifischen, z. B. über Additiveren, eingestellten Kennwerte.

Verbrauchskenngrößen:

Bei der Kunststoffaufbereitung wird neben Energie (Strom, Erdgas, Diesel) vor allem Wasser eingesetzt, Hilfsstoffe werden insbesondere bei der Abwasserreinigung verwendet. Bezug genommen wird auf den Durchsatz und den Verfahrensinput.

Emissionen in die Umwelt/Umweltbelastung:

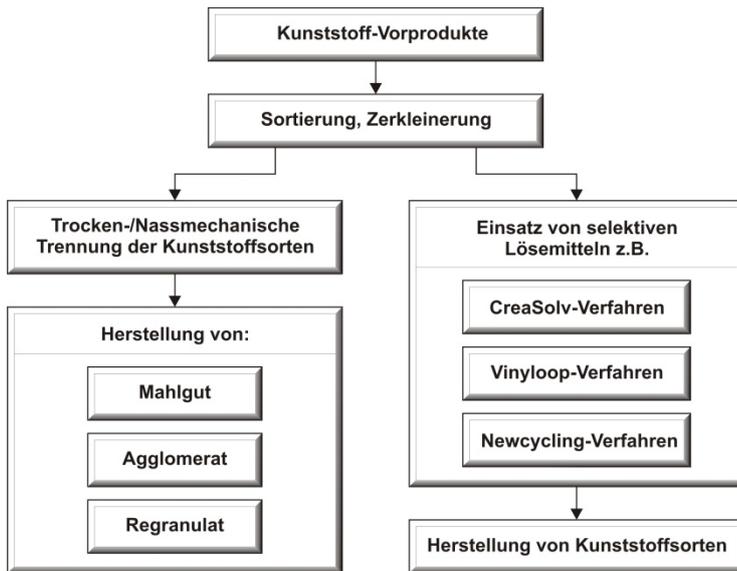
Mit der Kunststoffaufbereitung gehen Emissionen in die Luft (Staub, Gerüche) und das Wasser (gereinigtes Abwasser der Waschprozesse, Kondensate etc.) einher. Zudem fallen Abfälle (Schlamm, Sortierreste) an.

2.2.1 Verfahren der werkstofflichen Verwertung

Die werkstoffliche Verwertung von Kunststoffen beschreibt die Aufbereitung von Kunststoffabfällen zu neuen Produkten, wobei die Struktur der Moleküle nicht oder nicht wesentlich verändert wird [Hopmann; Michaeli 2017]. Ausgangsprodukt bilden die vorsortierten oder separat erfassten Kunststofffraktionen, die neben dem Zielkunststoff Störstoffe und andere Kunststoffe enthalten. Viele Kunststoffe sind untereinander unverträglich und schließen damit ein gemeinsames Recycling aus [Wilts et al. 2016]. Für eine hochwertige werkstoffliche Verwertung ist daher eine weitere Aufbereitung der Kunststofffraktionen erforderlich.

Die Aufbereitungsverfahren für eine werkstoffliche Verwertung umfassen zum einen die trocken- / nassmechanische Behandlung zur Herstellung von Mahlgut, Agglomerat oder Regranulat und zum anderen die Extraktion bestimmter Polymere mittels selektiv wirkender Lösemittel (Abbildung 13). Während sich das trocken- / nassmechanische Verfahren in der Praxis etabliert hat, konnten sich die lösemittelbasierten Trennverfahren – hierzu zählen das Vinyloop-, das CreaSolv- und das Newcycling-Verfahren – insbesondere aufgrund der Kosten für diese Technologie in Deutschland bislang nicht im großtechnischen Maßstab durchsetzen. Kurzbeschreibungen der genannten Verfahren sind in [Wilts et al. 2016] dokumentiert.

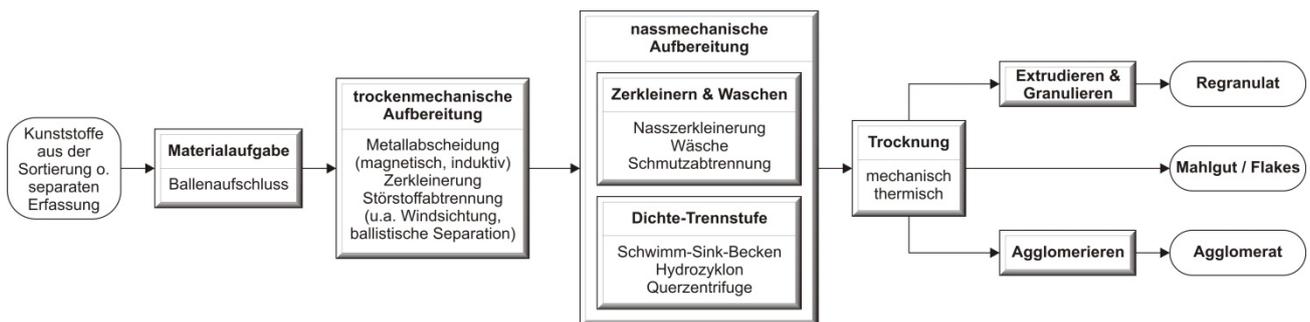
Abbildung 13: Verfahren der werkstofflichen Verwertung von Kunststoffen



Quelle: Eigene Darstellung

Die Kombination aus trocken- und nassmechanischen Verfahrensschritten stellt den Stand der Technik bei der Aufbereitung von Kunststoffvorprodukten dar und zielt auf die Abtrennung noch enthaltener Verunreinigungen (u.a. Papier, Metalle, Glas, Mineralik, Fremdkunststoffe) sowie auf die Erzeugung eines Kunststoffproduktes mit definierten Eigenschaften ab. Dabei durchläuft das Verfahren die in Abbildung 14 dargestellten wesentlichen Prozessschritte. Die Reihenfolge der Prozessschritte variiert in Abhängigkeit des aufzubereitenden Kunststoffvorproduktes, aber auch durch die am Markt vertretenen Anlagenhersteller. Individuelle Abweichungen von der nachfolgenden Verfahrensbeschreibung werden in den nachfolgenden Kapiteln bei der Einzelbetrachtung der Kunststoffe benannt.

Abbildung 14: Vereinfachte schematische Darstellung der trocken- / nassmechanischen Aufbereitung von Kunststoffen nach dem Stand der Technik



Quelle: Eigene Darstellung

Die Kunststoffe werden als Schüttgut in Big Bags oder als Ballen angeliefert. Im Anschluss an die Materialaufgabe und der manuellen oder mechanischen Öffnung der Ballen folgt die trockenmechanische Aufbereitung des Inputmaterials. Zunächst werden die Kunststoff-Vorprodukte auf eine Größe von ca. 10 bis 100 mm teilweise in mehreren Stufen mittels Schneidmühlen, Rotorscheren oder Schreddern zerkleinert. Bereits vorzerkleinerte Kunststoffkonzentrate aus der EAG-Aufbereitung werden sogleich trockenmechanischen aufbereitet. Magnet- und Wirbelstromscheider trennen im Mahlgut enthaltene Eisen- und Nichteisenmetalle ab. Für die trockenmechanische Abtrennung weiterer loser Verunrei-

gungen (z. B. Papier) kommen Windsichter (teilweise mit Zick-Zack- oder Kegelsichter), Ballistikseparatoren oder NIR-Trenner zum Einsatz.

Die sich anschließende nassmechanische Aufbereitung umfasst teilweise mehrstufige Wasch- und Trennprozesse. Dabei dient die Wäsche der Entfernung noch anhaftender Verunreinigungen wie beispielsweise Fette, Lebensmittelreste, Kosmetikbestandteile, Etiketten, Klebstoffanhaftungen oder Sand. Für stark verschmutzte Kunststoffe (maßgeblich Verpackungskunststoffe) kommen hierfür Nassmühlen in Kombination mit Friktionswäschern zum Einsatz.

Zunächst wird der Materialstrom in der Nassschneidmühle unter Zugabe von Wasser und bei hoher Drehzahl auf eine Korngröße von < 12 mm nachzerkleinert. Dabei entstehende Reibungseffekte bewirken eine Reinigung des Mahlgutes. Die Verunreinigungen werden im Anschluss mit Hilfe des Friktionswäschers abgetrennt. Der Friktionswäscher besteht aus einem schrägstellenden, schnelllaufenden Paddelrotor, der von einem Sieb (3 bis 10 mm [Herstellerangaben]) und einem Trog umgeben ist. Für diesen Prozessschritt wird abermals Wasser zugeführt. In Kombination mit der entstehenden Friktionswärme bewirkt der Friktionswäscher eine intensive Reinigung und entfernt Organik- und Papieranhaftungen sowie Kleberreste weitestgehend. Der Einsatz von Chemikalien ist nicht erforderlich.

Das gereinigte Mahlgut enthält neben dem Zielpolymer noch immer andere Kunststoffe und Störstoffe (z. B. Holz, Gummi, Glas), die mit den vorhergehenden Verfahrensschritten noch nicht abgetrennt wurden. Die Rückgewinnung bestimmter Kunststoffsorten erfolgt mit Hilfe der Dichtentrennung im nassen Medium. Dieses Verfahren macht sich das unterschiedliche spezifische Gewicht der enthaltenen Komponenten zunutze. In Tabelle 6 sind die Dichten unterschiedlicher Materialien aufgelistet. Stand der Technik sind Schwimm-Sink-Becken, Hydrozyklone und Sortierzentrifugen. Während das Schwimm-Sink-Verfahren auf dem klassischen Prinzip der Schwerkraft beruht, bewirkt bei den anderen beiden Trennverfahren die Zentrifugalkraft eine erheblich schnellere und effektivere Trennung. Neben einer verbesserten Trennleistung, sind beide Trennverfahren für die Sortierung kleinerer Korngrößen besonders geeignet [Martens; Goldmann 2016]. Im Fall sich überlappender Dichtebereiche einzelner Kunststoffsorten sind weitere trockene Aufbereitungsschritte erforderlich. Hierfür kommt die NIR-Technik (vgl. Kapitel 2.1.1) oder alternativ bei rußgefärbten schwarzen Kunststoffen beispielsweise die elektrostatische Separation zum Einsatz (vgl. Kapitel 2.2.4.6).

Tabelle 6: Dichtebereiche für ausgewählte Kunststoffe und andere Materialien

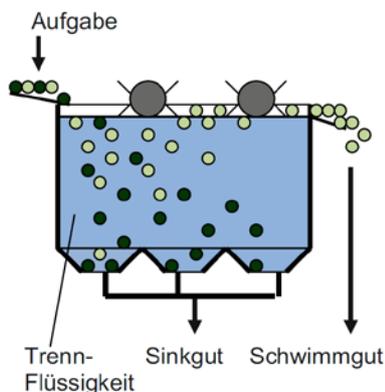
Material	Dichte [g/cm³]
PP	0,89 – 0,915
PE-LD	0,915 – 0,92
PE-HD	0,94 – 0,96
PA	1,12 – 1,15
PS	1,04 – 1,05
PVC	1,38 – 1,40
PET	1,33 – 1,40
ABS	1,04 - 1,05
Holz	0,8 – 1,2
Gummi	1,1 – 1,3
Glas	2,5 – 2,6

Quelle: Bauer et al. 2017, Cyclos-htp 2017

Bei dem **Schwimm-Sink-Verfahren** (Abbildung 15) wird das Mahlgut mit Hilfe von Rührwerken oder Schneckenförderern in flüssigkeitsgefüllte, offene Behälter eingebracht. In Abhängigkeit der Dichte der Trennflüssigkeit sinken schwere Bestandteile ab und leichte Bestandteile schwimmen auf. Als Trennmedium dient Wasser (mittlere Dichte: 1 g/cm^3), das je nach Trennaufgabe zur Einstellung unterschiedlicher Dichten mit entsprechenden Zusätzen versetzt wird (z. B. erhöhen Salze die Trenndichte). Paddelwalzen an der Wasseroberfläche sorgen für ein wiederholtes Eintauchen des Materials und die Förderung durch den Behälter. Der Behälterboden ist mindestens zweigeteilt. Auf diese Weise können Materialien hoher Dichte und Absetzgeschwindigkeit (z. B. Metalle, Glas, Sand) vom übrigen Schwergut (z. B. Papier, Kunststoffe) getrennt werden. Das Schwergut wird mittels pneumatischer Schleusen, Kratzkettenförderer oder Schnecken am Behälterboden ausgetragen. Die ideale Korngröße für dieses Verfahren liegt zwischen 5 und 10 mm [Martens; Goldmann 2016].

Das Schwimm-Sink-Verfahren zeichnet sich durch einen einfachen Verfahrensaufbau und vergleichsweise niedrige Investitionen aus. Der Trennerfolg ist im Wesentlichen von der Kornform und -größe abhängig, da diese die Sinkgeschwindigkeit beeinflussen. Anhaftungen wie Luftbläschen oder Fremdpartikel verändern die Dichte und führen zu Fehlausträgen in der Schwimm- bzw. Sinkfraktion. Turbulenzen, hervorgerufen durch die Zufuhr des Trennmediums oder die Ein- und Austragsaggregate, wirken ebenfalls negativ auf das Trennergebnis. Die Gewährleistung einer wirbelfreien Strömung im Behälter führt zu hohen Verweilzeiten (mehrere Minuten) und damit zu vergleichsweise niedrigen Durchsatzleistungen. Die geringen Dichteunterschiede der zu trennenden Kunststoffe führen zu niedrigen Absetzgeschwindigkeiten und erfordern großvolumige Behälter [Kranert et al. 2010]. Laut Herstellerangaben beträgt der Durchsatz in Abhängigkeit der Dimensionierung des Schwimm-Sink-Behälters beispielsweise für formstabile Kunststoffe 2,5 – 5 Mg/h und für Folienware 0,5 – 1,0 Mg/h.

Abbildung 15: Trennprinzip der nassen Dichtentrennung im Gravitationsfeld der Erde – Schwimm-Sink-Verfahren



Quelle: Martens; Goldmann 2016

Die Dichtentrennung im **Hydrozyklon** (Abbildung 16 links) erfolgt bei dem nahezu Hundertfachen der Erdbeschleunigung [Kranert et al. 2010]. Zunächst werden die zerkleinerten und gereinigten Kunststoffe mit dem Trennmedium vermischt. Diese Suspension wird tangential unter Druck zugeführt und durch die Geometrie des Zyklons in Rotation versetzt. Es bilden sich ein nach unten gerichteter Außenwirbel und ein nach oben gerichteter Innenwirbel. Die Rotation bewirkt, dass schwere Stoffe an die Wand des Hydrozyklons gedrückt und im Unterlauf ausgetragen werden. Leichtere Stoffe hingegen werden zusammen mit dem Großteil der Flüssigkeit dem Innenwirbel folgend nach oben hin ausgetragen.

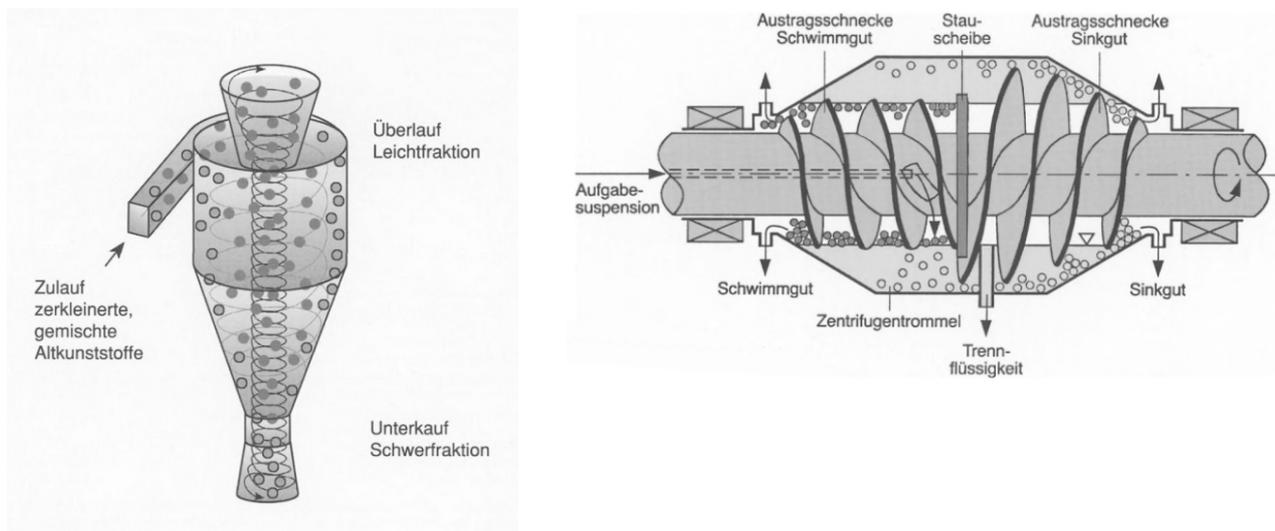
Das Hydrozyklonverfahren zeichnet sich durch einen einfachen und raumsparenden Aufbau ohne bewegte Teile sowie durch geringe Investitionen und Betriebskosten aus. Durch den Einfluss der Zentri-

fugalkraft wird die Trennwirkung im Vergleich zum Schwimm-Sink-Becken verbessert. Das Verfahren erfordert jedoch ein möglichst enges Korngrößenspektrum, um Fehlausträge zu vermeiden. Die Verweilzeit beträgt circa eine Sekunde [Kranert et al. 2010]. In Abhängigkeit der Trennaufgabe kommen Schwimm-Sink-Behälter und Hydrozyklone auch kombiniert zum Einsatz.

Für die Trennung mittels **Zentrifuge** wird das gereinigte Mahlgut zunächst mit Wasser vermischt. Diese Suspension wird axial in die rotierende Zentrifugentrommel dosiert und auf über das Tausendfache der Erdbeschleunigung beschleunigt [Bauer et al. 2017]. Aufgrund der Fliehkraft werden Materialien mit höherer Dichte als das Trennmedium nach außen zum Zentrifugenmantel geschleudert, Materialien geringerer Dichte schwimmen nach innen auf (Abbildung 16 rechts). Beide Fraktionen werden mittels zwei gegenläufig aufgebrachter Schneckenwendel zu den konischen Enden transportiert und mechanisch entwässert (Restfeuchte: ca. 3 – 8 % [Kranert et al. 2010]) ausgetragen.

Die Sortierzentrifuge zeichnet sich durch eine effiziente Trennleistung mit einer hohen Trennschärfe aus - Reinheiten von mehr als 99 % sind möglich [Herstellerangaben]. Kornform und -größe sowie Anhaftungen (Luftbläschen oder Schmutz) haben nahezu keinen Einfluss auf das Trennergebnis. Die hohen Scherkräfte zwischen dem Material und der Flüssigkeit sorgen zusätzlich für eine Reinigung des Trenngutes. Zudem erfolgt eine Entwässerung der erzeugten Fraktionen. Die Schmutzpartikel reichern sich im Schwergut an. Dies sorgt zudem für eine teilweise Klärung des Wassers, das für die Herstellung der Kunststoff suspension wieder eingesetzt werden kann und den Frischwasserbedarf niedrig hält. Aufgrund der komplexen Technik ist das Aggregat mit seinen bewegten Teilen wartungsintensiv und verursacht entsprechend hohe Aufwendungen.

Abbildung 16: Dichtentrennung im Zentrifugalfeld – Hydrozyklon (links) und Sortierzentrifuge (rechts)



Quelle: Nickel 1996

Nach dem nassmechanischen Prozessschritt muss das Material für nachfolgende Verarbeitungsschritte getrocknet werden. Für die Trocknung kommen mechanische und/oder thermische Verfahren (Umluft-, Gegenstrom- oder Infrarottrockner) zum Einsatz. Bei der mechanischen Trocknung wird dem Material die Feuchtigkeit mittels trocken arbeitender Zentrifugen entzogen. Im Fall der thermischen Trocknung durchströmt erwärmte Luft das feuchte Material. Der dabei entstehende Wasserdampf wird von der Luft aufgenommen und abgeführt. Für eine anschließende Extrusion liegt der Restfeuchtegehalt des gereinigten Mahlgutes idealerweise unter 3 % [Herstellerangaben].

Das getrocknete Mahlgut wird je nach Anforderung des Rezyklatabnehmers als **Mahlgut/ Flakes** bereitgestellt oder in einem abschließenden Prozessschritt zu **Agglomeraten** oder sogenannten **Regra-**

nulaten aufbereitet. Beim Agglomerieren werden die Kunststoffpartikel mit dem Ziel der Erzeugung höherer Schüttdichten und der Vereinheitlichung der Korngröße und -form durch oberflächliches Anschmelzen miteinander verbunden. Zum Einsatz kommen Topfagglomeratoren oder Matrizenpressen [Dehoust, Christiani 2012].

Das Umschmelzen in rieselfähiges Regranulat umfasst die Extrusion und Granulierung. Zunächst wird das Kunststoffmahlgut in einem Extruder unter dem Einfluss von Wärme und Druck kontinuierlich aufgeschmolzen und zu einer homogenen Masse plastifiziert. Die flüssige Masse wird dabei in einer **Schnecke** homogenisiert. Diese dient ferner zum Materialtransport zwischen der Sieb- und der Entgasungs- sowie Granuliereinheit. Zum Einsatz kommen Ein-, Doppel- oder Mehrwellenextruder. Restfeuchte und flüchtige Bestandteile werden in der **Entgasungseinheit** mittels Unterdruck entfernt. Dieser Unterdruck wird durch Vakuumpumpen erzeugt (Vakuumentgasung). In der Kunststoffschmelze noch enthaltene Verunreinigungen wie beispielsweise Holz-, Papierfasern oder nicht schmelzbare Kunststoffe werden mit sogenannten **Schmelzefiltern** abgetrennt. In Abhängigkeit von den enthaltenen Verunreinigungen und dem Qualitätsziel werden Filterfeinheiten zwischen 60 µm (z. B. PET-Verarbeitung) und 250 µm (z. B. Spritzgussanwendungen) eingesetzt. Es werden diskontinuierliche und kontinuierliche Schmelzefilter unterschieden, wobei letztere bei stärkeren Verschmutzungen zum Einsatz kommen und damit häufige Produktionsunterbrechungen vermeiden. Vakuumentgasung und Schmelzefiltration tragen zur Verbesserung der Produktqualität bei. Das gesiebte und entgaste Material gelangt anschließend zur **Granuliereinheit**. Am Ausstoß des Extruders wird die Schmelze durch eine Lochplatte gepresst und mittels Wasserring-, Strang- oder Unterwassergranulierung⁸ in die typische Form (Linsen, Zylinder, Kugel) gebracht.

Die erzeugten Regranulate weisen standardmäßig ein Farbspektrum von hellgrau bis schwarz auf. Durch den Einsatz von sogenannten Farbmaterbatches wird das Rezyklat überfärbt, sodass auch verschiedene Braun-, Blau- und Grüntöne erzielt werden. Zur Erweiterung des Farbspektrums setzen die Kunststoffaufbereiter vermehrt Aggregate zur Farbsortierung des getrockneten Mahlgutes ein [Wilts et al. 2016].

Abbildung 17: Mahlgut (links), Agglomerat (Mitte), Regranulat (rechts)



© u.e.c. Berlin



© Relux Kunststofftechnik GmbH



© u.e.c. Berlin

⁸ Bei der Wasserringgranulierung wird der Extrusionsstrang direkt durch ein rotierendes Messer abgeschnitten und die noch heißen Granulate in einen umlaufenden Wasserring geschleudert, man spricht vom Heißabschlag. Es entsteht ein linsenförmiges Regranulat. Bei der Stranggranulierung wird der Extrusionsstrang erst im Wasserbad abgekühlt und im festen Zustand auf Länge geschnitten, man spricht vom Kaltabschlag. Es entsteht ein zylinderförmiges Regranulat. Bei der Unterwassergranulierung befindet sich das formgebende Werkzeug unter Wasser und ein Messer schneidet den Polymerstrang direkt am Werkzeug ab. Es entsteht kugelförmiges Granulat.

Prozesswasserführung und Energierückgewinnung

In Kunststoffverwertungsanlagen wird Wasser für Waschprozesse, die Nasszerkleinerung und die Dichtentrennung der Kunststoffe eingesetzt. Zur Minimierung des Frischwassereinsatzes wird das Prozesswasser weitestgehend im Kreislauf geführt und von eingetragenen Verschmutzungen weitestgehend gereinigt. Je nach Grad der Verschmutzung kommen unterschiedlich aufwendige Verfahren zum Einsatz. Diese reichen von einer einfachen groben Filtrierung bis hin zu einer betrieblichen Abwasser- aufbereitungsanlage.

In der Praxis kommen zur Abtrennung der Feststoffe (z. B. Sand, Fasern, Kunststoffpartikel) beispielsweise Absetzbecken, Trommelsiebe oder Dekanter zum Einsatz, unter Zuhilfenahme chemischer Fällungs- und Flockungsmittel, Flockungshilfsmittel und sogenannter Entschäumer. Der dabei entstehende Schlamm wird ordnungsgemäß entsorgt. Insbesondere in Anlagen mit einer einfacheren Feststoffabscheidung muss ein Teil des Prozesswassers ausgeschleust und durch Frischwasser ersetzt werden. Dieses sogenannte Überschusswasser wird extern entsorgt, teilweise erfolgt die Einleitung in das regionale Abwassernetz unter Berücksichtigung der jeweiligen Einleitbedingungen.

Um die Arbeitstemperatur im Extruder aufrecht zu erhalten, verfügen Extruder über ein Kühlsystem. In modernen Anlagen wird die hierbei abgeführte Wärmeenergie über Wärmepumpen als Nutzwärme auf den vorgelagerten Trocknungsprozess übertragen. Dies optimiert sowohl den Kühlbedarf der Extruder als auch den Heizbedarf der Trocknung.

Die Nutzung der Trocknerabwärme ist bislang nicht technisch umgesetzt.

2.2.2 Qualität der Altkunststoffrezyklate

Von anwendungstechnischem Interesse sind insbesondere die mechanischen, chemischen und thermischen Eigenschaften der Kunststoffrezyklate. Diese werden durch Alterungsprozesse der Ausgangsprodukte zum Beispiel infolge von UV-Strahlung, Feuchtigkeit oder Temperatur beeinflusst. Darüber hinaus verändern sogenannte Vermischungsschäden das Eigenschaftsprofil der Rezyklate im Vergleich zur Neuware. Diese Vermischungsschäden beruhen zum einen auf unvollkommenen Trennprozessen während der Aufbereitung. Zum anderen werden bereits dem Primärkunststoff Additive, Füllstoffe oder andere Kunststoffsorten zur Optimierung des Eigenschaftsprofils zugemischt. Diese Fremd- und Störstoffe können mit der in Kapitel 2.2.1 beschriebenen Aufbereitungstechnik nicht abgetrennt werden und verbleiben im Rezyklat. Auch der Recyclingprozess selbst führt zu Veränderungen der Eigenschaften der Kunststoffe, z. B. aufgrund mechanischer oder thermischer Beanspruchung.

Die Änderungen des Eigenschaftsprofils müssen jedoch nicht zwangsläufig von Nachteil sein. Rezyklate können beispielsweise geringere Maß- und Formveränderungen aufweisen als Neuware. Das nutzen zum Beispiel Automobilhersteller und setzen entsprechende Rezyklate (z. B. faserverstärkte PA-Rezyklate) in Anwendungen wie Stoßfängerbefestigungen und Scheinwerfergehäusen ein [dpa 2015].

Die Herausforderung für die Recyclingunternehmen besteht nun darin, trotz wechselnder Inputzusammensetzungen gleichbleibende Qualitäten gemäß den Anforderungen der Hersteller zu erzeugen. Um die Qualität der Rezyklate zu verbessern, werden häufig Additive wie Stabilisatoren, Pigmente, Geruchsstoffe, Weichmacher oder auch Füllstoffe eingesetzt [Maier et al. 2016]. Grundsätzlich gilt aber, dass auf diese Weise erzeugte Rezyklate nicht variabel einsetzbar sind. Durch die speziellen Eigenschaften kommt das Rezyklat ggf. nur für eine bestimmte Anwendung in Frage. Wird zum Beispiel ein für Spritzgussanwendungen erforderlicher höherer MFR eingestellt, ist dieses Material für die Profilextrusion nicht mehr geeignet. Erfolgt dagegen durch den Aufbereiter keine weitere Anpassung seiner erzeugten Rezyklate, sind die Wiedereinsatzgebiete umfangreicher, jedoch muss der Endproduzent dann ggf. entsprechend aufwendige Anpassungen vornehmen.

Letztendlich sind die Rezyklateigenschaften ausschlaggebend für die Anwendung (z. B. Einsatz im Spritzgussverfahren oder zur Herstellung von Folien durch Folienextrusion). Zur Charakterisierung der Rezyklate gelten die gleichen Normprüfungen wie für Neuware [Maier et al. 2016]. Kunststoffaufbereiter unterziehen die Rezyklate daher entsprechenden Prüfverfahren, die insbesondere Auskunft über die rheologischen und mechanischen Eigenschaften geben. Die hierbei ermittelten Werte dienen dem Hersteller (Rezyklatanwender) als Richtwerte. Der Informationsgehalt der verfügbaren Datenblätter ist nicht einheitlich geregelt und variiert zwischen den einzelnen Kunststoffaufbereitern. Nachfolgend werden die überwiegend angegebenen Kennwerte kurz benannt und erläutert. Eine vergleichende Betrachtung der Parameter für Rezyklate und Primärkunststoff ist aufgrund der zahlreichen Kunststoffmodifikationen nur auf Produktebene sinnvoll. Entsprechende Daten liegen nicht vor.

Für das Verarbeitungsverhalten sind die rheologischen Eigenschaften, genauer die Viskosität, von Bedeutung. Die Viskosität und damit das Fließverhalten eines Werkstoffs werden durch den **Schmelzflussindex (MFR – Melt Flow Rate)** beschrieben. Der Index gibt an, welche Masse einer Kunststoffschmelze unter einem definierten Druck in einem Zeitintervall von 10 Minuten bei einer festgelegten Temperatur durch eine definierte Prüfdüse gepresst werden kann [DIN EN ISO 1133-1:2012-03]. Eine niedrige Viskosität (hoher MFR) eignet sich beispielsweise für das Spritzgießverfahren, da hierbei eine hohe Fließfähigkeit gefordert ist. Für die Extrusion werden hohe Viskositäten (niedriger MFR), die mit einer besseren Schmelzfestigkeit einhergehen, benötigt [Abts 2016]. Dieses Normprüfverfahren ist u.a. anzuwenden für die Kunststoffsorten PP, PE, PS und ABS.

Für andere Kunststoffsorten gelten andere Prüfnormen. Im Fall von PET dient die sogenannte intrinsische Viskosität (DIN EN ISO 1628-5:2015-5) als Maß für das Molekulargewicht, das unmittelbar von der Kettenlänge abhängt. Die intrinsische Viskosität wird in Deziliter pro Gramm (dl/g) angegeben und spiegelt den Schmelzpunkt, die Kristallinität und die Zugfestigkeit des PET wider. Für PVC-Fensterprofile, PVC-Fußbodenbeläge, PVC-Rohre sowie –Behälter und –Folien ist der K-Wert nach Fikentscher (DIN EN ISO 1628-2:1999-11) ein wichtiges Qualitätsmerkmal. Der K-Wert ist ebenfalls ein Maß für den Polymerisationsgrad der PVC-Moleküle, also der Polymerkettenlänge und damit der Molmasse, die die mechanischen und rheologischen Eigenschaften des Kunststoffes beeinflusst. Die mechanischen Eigenschaften geben Auskunft über das Verformungsverhalten (Spannungs-Dehnungsverhalten, Bruchverhalten) sowie das Verschleiß- und Reibverhalten (u.a. Materialhärte) und werden mit verschiedenen Materialwerten charakterisiert. In den Datenblättern unterschiedlicher Rezyklathersteller werden folgende Kennwerte angegeben:

Die **Schlagzähigkeit** beschreibt die Fähigkeit eines Werkstoffes, Stoßenergie und Schlagenergie zu absorbieren, ohne zu brechen und wird als Verhältnis aus Schlagarbeit und Probekörperquerschnitt (Einheit: kJ/m^2) angegeben. Wandstärke, Form und Größe des Bauteils sowie die Stoßgeschwindigkeit sind dabei zu berücksichtigende Faktoren. In der Praxis erfolgt die Prüfung überwiegend mit der genormten Messmethode nach Charpy [EN ISO 179-1:2010]. Werkstoffe mit einer sehr hohen Schlagzähigkeit brechen nicht.

Das Elastizitätsmodul (Einheit: MPa), auch **Zug-E-Modul** genannt, beschreibt das Verhältnis von Zugspannung zu Zugdehnung [EN ISO 527-1:2012]. Je größer der Widerstand eines Materials gegen eine Verformung ist, desto größer ist der Wert des Elastizitätsmoduls.

Bruchdehnung (Einheit: %), **Streckspannung** (Einheit: MPa) und **Zugfestigkeit** (Einheit: MPa) kennzeichnen die mechanische Belastbarkeit von Kunststoffen [EN ISO 527-1:2012]. Bei einer Überbelastung bricht der Kunststoff und kann sich dabei duktil (mit plastischer Verformung) oder spröde (ohne/geringe plastische Verformung) verhalten.

Die **Härte** beschreibt den Widerstand, den ein Werkstoff dem Eindringen eines Fremdkörpers entgensetzt. Für die Charakterisierung von Kunststoffrezyklaten hat sich die Angabe der Shore-Härte durchgesetzt [DIN EN ISO 868:2003]. Hierbei wird mittels Prüfspitze die Eindringtiefe gemessen (Ein-

heit: dimensionslos). Es werden zwei Härte-Skalen unterschieden; Shore A für weiche (gummiartige) Materialien und Shore D für härtere Materialien.

Neben diesen die rheologischen und mechanischen Eigenschaften charakterisierenden Parametern entscheiden auch die **Farbe** und insbesondere der **Geruch** über den Einsatz der Kunststoffrezyklate. Zwischen Primär- und Sekundärmaterial bleibt in der Regel ein Farbunterschied erkennbar, was als Hemmnis beim Wiedereinsatz anzusehen ist [Wilts et al. 2016]. Die Rezyklatfarbe und damit das Farbspektrum kann, wie bereits in Kapitel 2.2.1 beschrieben, durch eine Farbsortierung auf Flakeebene beeinflusst werden. Hierbei lassen sich Mono-Farben oder leichter überfärbbare Typen erzeugen. Je nach Qualität der Aufbereitung und der daraus erzeugten Kunststoffrezyklate können durch das Einfärben der Rezyklate Farbqualitäten erzeugt werden, die von Primärware kaum noch zu unterscheiden sind.

Die Auslöser für Gerüche in Kunststoffen sind sehr vielfältig. Hierzu zählen Oxidations- und Hydrolyseprodukte, Aldehyde, Ketone, Carbonsäuren. Bereits bei der Kunststoffverarbeitung können sich beim Einsatz von Additiven und Füllstoffen geruchsrelevante Zersetzungsprodukte bilden. Darüber hinaus werden Gerüche durch die Migration von Substanzen aus Kosmetika-, Reinigungsmittel- oder Lebensmittelresten verursacht. Mikroskopisch kleine Verunreinigungen wie beispielsweise Holz, Gummi, Silikon oder Papier, die sich nach der Aufbereitung noch im Mahlgut befinden, können bei der Extrusion leicht verbrennen und unangenehme Gerüche hervorrufen [Kitzberger 2017].

In der Praxis werden speziell an die Kunststoffe angepasste Additive zur Geruchsminderung eingesetzt. Seit etwa zwei Jahren existieren am Markt zudem Verfahren, die die Geruchssubstanzen mithilfe thermisch-physikalischer Prozesse neutralisieren.

Ein ebenfalls entscheidendes Kriterium für den Wiedereinsatz der Rezyklate in hochwertigen Anwendungen ist der Gehalt an Fremdkunststoffen und/oder Verunreinigungen, wie z. B. feine Splitter aus Glas oder Metall sowie sonstige Unreinheiten. Der tolerierbare Anteil dieser Störstoffe ist abhängig vom zu erzeugendem Produkt. In der Folienproduktion können Fehlstellen im Produkt beim Streckvorgang zum Abriss der Folienbahn führen. Darüber hinaus bewirken Verunreinigungen auch einen erhöhten Verschleiß an Schnecken und Zylinder des Extruders.

In der Regel ist es erforderlich, die Rezyklate für nachfolgende Anwendungen zu modifizieren. Das heißt, die Rezyklathersteller selbst oder zwischengeschaltete sogenannte Compoundierer passen die Rezyklate mit geeigneten Additiven dem Anforderungsprofil des Kunden an (Schlagzähigkeit, UV-Beständigkeit, Einfärbung, Flammschutz) [Maier et al. 2016]. Hierzu zählen u.a. Thermostabilisatoren, Lichtschutzstabilisatoren, Flammschutzmittel, Füllstoffe sowie Antistatika.

2.2.3 Emissionen und Umweltbelastungen im Zusammenhang mit der Altkunststoffaufbereitung

Die trocken-/nassmechanische Aufbereitung von Altkunststoffen erfolgt in geschlossenen Hallen. Von der Anlage ausgehende Geruch-, Staub- und Lärmemissionen spielen daher eher eine untergeordnete Rolle. Emissionsrelevant sind offene oder teilgeschlossene Lagerbereiche sowie Hallentore, über die Geruchs- und Staubemissionen diffus in die Außenluft gelangen können. Lärmemissionen im Außenbereich der Hallen werden lediglich durch Fahrbewegungen (durch Radlader, LKW) verursacht.

Im Inneren der Kunststoffrecyclingbetriebe können Staub, organische Gase und Dämpfe, Dieselemissionen, Schwermetalle und ggf. biologische Arbeitsstoffe freigesetzt werden. Die Staubemissionen beinhalten die Kunststoffe, deren Zuschlagsstoffe, ggf. Schwermetalle sowie weitere Inhaltsstoffe aus der Verwendung, dem Transport und der Lagerung der Kunststoffe [Ott et al. 2013]. Sie können insbesondere bei Anliefervorgängen und der trockenmechanischen Aufbereitung (Zerkleinerung, Sortierung) auftreten. Organische Gase und Dämpfe können bei thermischen Prozessen, wie der Extrusion freige-

setzt werden. Als biologische Arbeitsstoffe sind Schimmelpilze, Bakterien und Endotoxine zu nennen, die aus der Verarbeitung kontaminierter Kunststoffe herrühren [Ott et al. 2013].

Die Hallenabluft wird gefasst, über einen Staub- und/oder Aktivkohlefilter geführt und an die Umgebung abgegeben. Die technischen Maßnahmen zur Minimierung der Staubfreisetzung an Transport-, Einfüll- und Abfüllvorrichtungen umfassen Absaugung, Kapselung und Einhausung der entsprechenden Aggregate oder Teilbereiche. Bei der Extrusion werden insbesondere in den Entgasungszonen und in der Filtereinheit flüchtige organische Bestandteile freigesetzt. Diese Stellen werden gemäß dem Stand der Technik abgesaugt und anschließend in einem Nassabscheider (z. B. Venturiwäscher) gereinigt. Bei dem Venturi-Nassabscheider-Prinzip wird die zu reinigende Abluft an der Entstehungsstelle abgesaugt und in den Abscheider geführt. In der sogenannten Bedüsungszone wird das Rohgas, bedingt durch die Geometrie des Abscheiders, stark beschleunigt. Dabei wird im Abscheider befindliches Wasser injektorartig angesaugt und fein zerstäubt. Die feinen Wassertropfen benetzen die luftfremden Stoffe. Das Wasser-Luft-Gemisch wird in starke Rotation versetzt. Durch die Fliehkraft werden die Wassertropfen vom Luftstrom getrennt. Die gereinigte Luft wird abschließend über einen Aktivkohlefilter geführt. Abgeschiedene Abluftbestandteile werden ausgetragen, entwässert und entsorgt.

Als weitere zu entsorgende Reste sind die Schlämme aus der Prozesswasserreinigung sowie Sortierreste aus der trockenen sowie nassen Aufbereitung der Kunststoffe zu nennen. Anfallendes Überschusswasser wird extern entsorgt. Bei Einleitung in das kommunale Abwassernetz sind die Anforderungen des Klärwerksbetreibers zu berücksichtigen, u.a. sind hier die Parameter chemischer Sauerstoffbedarf, der Anteil absetzbarer Stoffe sowie der pH-Wert zu nennen.

2.2.4 Detailbetrachtung

Stand der Technik für die werkstoffliche Aufbereitung von Altkunststoffen ist in Deutschland die trocken-/nassmechanische Aufbereitung. Für die zu betrachtenden Kunststofffraktionen gibt es teilweise spezifische Besonderheiten bei der Aufbereitung und den damit in Zusammenhang stehenden Energie- und Wasserverbräuchen. Ferner zeigen sich u.a. Unterschiede hinsichtlich der Rezyklatausbeute. Die nachfolgenden Kapitel beinhalten eine Dokumentation der recherchierten Informationen zu diesen spezifischen Besonderheiten. Für eine Erweiterung von Detailinformationen wurden gezielt Kunststoffaufbereiter im Rahmen einer Fragebogenaktion befragt. Der Rücklauf der Fragebögen lag unter 10 %, sodass sich die nachfolgenden Erläuterungen maßgeblich auf Angaben aus der Literatur beziehen.

2.2.4.1 Recycling von PP und PE

Formstabile Kunststoffe der Sorten PP und PE stammen maßgeblich aus der Sortierung von LVP/WST-Gemischen (vorwiegend Verpackungstypen), aber auch aus gemischten Gewerbeabfällen, gemischten Bau- und Abbruchabfällen und Sperrmüll. Ferner sind Stoßfänger aus der Demontage hier einzuordnen. Die werkstoffliche Aufbereitung der Kunststoffsorten PP und PE (hier: HDPE) bzw. eines Polyolefingemisches (PP/PE) erfolgt gemäß dem beschriebenen trocken-/nassmechanischen Verfahren (Kapitel 2.2.1). PE und PP werden aufgrund ihrer im Vergleich zum Wasser geringen Dichte in der Schwimmfraktion ausgetragen. Eventuell enthaltene Störstoffe mit höherer Dichte oder auch mit Füllstoffen versetzte Kunststoffe werden mit der Sinkfraktion aus dem weiteren Prozess ausgeschleust.

Zielt die Aufbereitung auf eine Abtrennung von PP bzw. PE sind nassmechanische Verfahren aufgrund eines zu geringen Dichteunterschiedes nicht zielführend. Stand der Technik zur Trennung von PP- und PE-Flakes ist die Nahinfrarotspektroskopie (NIR-Trennung).

Rezyklatausbeute:

Die Rezyklatausbeuten für Post-Consumer PE- und PP-Fraktionen der genannten Abfallströme liegen im Bereich von 65 – 75 % bezogen auf den feuchten Input. Der Feuchtegehalt des Inputmaterials aus der Vorsortierung kann die Rezyklatausbeute rechnerisch erheblich beeinträchtigen. Insbesondere im Verpackungsbereich können anhaftende Lebensmittelreste sowie Papieretiketten, die bei unüberdachter Lagerung Feuchtigkeit aufnehmen, zu Feuchtegehalten von bis 20% führen. Die Rezyklate weisen im Gegensatz dazu eine deutlich geringere Restfeuchte auf (z. B. HDPE-Regranulate: <0,1%).

Qualität der Rezyklate:

Ausgehend von den Angaben der Rezyklathersteller weist Tabelle 7 exemplarisch Qualitätskennwerte (Kapitel 2.2.2) mit Angaben zur Herkunft und den Einsatzmöglichkeiten aus.

Tabelle 7: Qualität der PP-, PE-Rezyklate (exemplarisch)

Kennwert	Einheit	PP-Rezyklat (1)	PP-Rezyklat (2)	HDPE-Rezyklat (1)	HDPE-Rezyklat (2)	PO-Rezyklat
Herkunft	-	Verpackungen	Stoßfänger	Verpackungen	Verpackungen	Verpackungen / Sperrmüll
MFR 230°C/2,16 kg	g/10 Min	10 - 50	6 – 8	-	-	≥ 5
MFR 230°C/5 kg	g/10 Min	-	28 - 32	-	-	-
MFR 190°C/5 kg	g/10 Min	-	-	11,5 – 12,5	1,5 – 3	-
Kerbschlagzähigkeit Charpy 23°C	kJ/m ²	2 - 6	-	15 – 25	> 10	≥ 6
Kerbschlagzähigkeit Charpy -23°C	kJ/m ²	-	-	-	-	≥ 2,5
Zug-E-Modul	MPa	1000 - 1300	860	850 – 1050	> 700	≥ 820
Bruchdehnung	%	-	86	-	-	≥ 150
Zugfestigkeit	MPa	≥ 25	16	> 27	> 19	≥ 20
Shore-Härte (D)	-	-	55	-	-	55 - 58
Farbe	-	nicht eingefärbt / grau	-	Farbabstufungen	bunt, hell	u.a. grau, blau, grün, rot, braun, schwarz
Verarbeitungsverfahren lt. Hersteller	-	Spritzguss	-	Spritzguss, Extrusion	Regranulierung, Rohextrusion	-
Einsatzgebiete (Teilweise Herstellerangaben)	-	Radlaufschaalen o.Ä. mit hohen Steifigkeits- und Schlagzähigkeitsanforderungen, Rohre (drucklos), Wellrohre, Platten nicht im Lebensmittel-, Spielzeug-, pharmazeutischen-, medizinischen- und Kosmetikbereich				

Quelle: Produktdatenblätter unterschiedlicher Kunststoffaufbereiter

Verbrauchskenngrößen:

Tabelle 8: Verbrauchskenngrößen der trocken-/nassmechanischen Aufbereitung von PP und PE

Kennwert	
Stromverbrauch	450 - 700 kWh/Mg Input
Wasserbedarf	0,5 m ³ /Mg Input
Dieselbedarf für Mobilgeräte	12 kWh/Mg Input (entspricht 1,2 l/Mg Input ⁹)

Quelle: [Meyer et al. 2009, Dehoust 2016]

2.2.4.2 Recycling von PET

PET ist ein typischer Verpackungskunststoff und heutzutage insbesondere aus dem Bereich der Getränkeverpackungen nicht mehr wegzudenken. Im Jahr 2015 wurden rund 97 Ma.-% (rund 642.000 Mg/a) der insgesamt in Deutschland verarbeiteten PET-Menge zu Verpackungen, maßgeblich Getränkeverpackungen, verarbeitet [Consultic 2016, GVM 2016]. Befandete PET-Getränkeflaschen werden über Pfandrücknahmesysteme separat erfasst und einer Verwertung zugeführt. Andere PET-Verpackungen (z. B. Spülmittelflaschen, unbefandete Getränkeflaschen, Becher und Schalen) landen als Abfall im LVP-Sammelgemisch und im Anschluss an die Sortierung in der Misch-PET-Fraktion oder als Teilstrom in der Mischkunststofffraktion. Die Misch-PET-Fraktion wird noch einmal nachsortiert. Der Fokus dieser Sortierung liegt auf den PET-Flaschen. Transparente PET-Flaschen aus der LVP-Sammlung können gemäß den Vorgaben der EFSA (European Food Safety Authority) bei entsprechender Aufbereitung bis zu einem Anteil von maximal 5 % im Food-Bereich eingesetzt werden. Bislang lassen die Güte- und Prüfkriterien der RAL-Gütegemeinschaft "Wertstoffkette PET Getränkeverpackungen e.V." aus Gründen der Qualitätssicherung gar keine Abmischungen zu. Das Einsatzmaterial darf nur aus Sammelsystemen für PET-Getränkeverpackungen stammen. Insofern ist dieser Anwendungsbereich für Kunststoffrezyklate aus der LVP-Sammlung in Deutschland derzeit verschlossen. Nicht transparente PET-Flaschen werden für Anwendungen im Non-Food-Bereich aufbereitet. Für PET-Schalen gibt es in Deutschland aktuell keine Verwertungsmöglichkeiten. Diese werden noch zusammen mit den Sortierresten energetisch verwertet. Getrieben durch die höheren Recyclingvorgaben im neuen Verpackungsgesetz gibt es jedoch erste Ansätze, auch die Schalen auszusortieren und die Rezyklate in neuen Produkten einzusetzen.

Deutsche PET-Recyclingunternehmen verarbeiten überwiegend PET-Getränkeflaschen aus der separaten Pfandsammlung zu Flakes oder Granulat. Im Anschluss an die Öffnung und Vereinzelung der angelieferten Ballen erfolgt das Aufbereitungsverfahren im Wesentlichen analog den in Kapitel 2.2.1 beschriebenen Prozessschritten.

In der Dichtentrennstufe (Schwimm-Sink-Trennung oder Hydrozyklon) werden die Reste der Verschlusskappen und des Sprengringes (maßgeblich HDPE) von der schwereren PET-Fraktion abgetrennt. Im Anschluss an die Trocknungsstufe werden die Flakes mittels Windsichtung von Folienresten befreit, Aggregate zur Farb- und Materialsortierung trennen noch verbliebene Fremdkunststoffe ab sowie bunte von transparenten Flakes.

⁹ Annahme: 1 Liter Diesel entspricht 9,9 kWh.

Abbildung 18: PET-Flakes



Quelle: Veolia 2017

Eine Besonderheit bei der Aufbereitung von PET ist die Heißwäsche vor oder nach der Dichtentrennung in Wasser. Die Heißwäsche ist ein Waschprozess und dient der vollständigen Entfernung von Klebstoff- und Getränke rückständen. Im Gegensatz zur herkömmlichen Wäsche wird das Waschwasser mittels Wärmetauscher erhitzt und mit Lauge sowie speziellen Waschmitteln versetzt. Zur Einstellung eines neutralen pH-Wertes werden die PET-Flakes anschließend in Reinwasser gespült und gereinigt. Das auf diese Weise erzeugte qualitativ hochwertige Mahlgut findet zum Beispiel als Ausgangsmaterial für nachgeschaltete Prozessschritte zur Herstellung lebensmitteltauglicher PET-Regranulate oder in der anspruchsvollen Folienproduktion Anwendung.

In einem weiteren Prozessschritt – der sogenannten Solid-State-Polykondensation (SSP) – werden die PET-Flakes über mehrere Stunden bei Temperaturen von 200 bis 240°C unter Druck gesetzt. Die PET-Moleküle werden dabei polykondensiert und kristallisiert. Auf diese Weise soll die Ausgangsviskosität bei der Regranulierung der PET-Flakes erhalten bleiben, um für hochwertige Anwendungen (Flaschen, Folien) wieder zur Verfügung zu stehen.

Patentierter Verfahren (u.a. URRC, Krones) ermöglichen in sich anschließenden Prozessschritten die Herstellung lebensmitteltauglicher PET-Flakes. Bei der chemischen Oberflächenbehandlung des URRC-Verfahrens (United Resource Recovery Corporation) werden die gewaschenen Flakes mit Natronlauge benetzt und nach einem Trocknungsschritt anschließend zur Intensivreinigung der Oberfläche und Entfernung von Gerüchen in einem Drehrohrofen bei über 200°C behandelt. Dies bewirkt eine Ablösung der obersten PET-Schicht und damit eine Entfernung restlicher Anhaftungen und migrierter Verunreinigungen. Die Nachbehandlung (Nachwäsche und Trocknung) dient der Entfernung des dabei entstandenen Salzes. Abschließend wird das Mahlgut zur Sicherstellung der Farbreinheit mittels Farbzeilenkamera sortiert und von bunten PET-Flakes und Fremdkunststoffen befreit. Bei dem Verfahren der Firma Krones werden die PET-Flakes einer Heißwäsche unterzogen und anschließend in mehreren Stufen mit heißem Wasser gespült. Im Anschluss an einen Trocknungsvorgang erfolgt die Dekontamination der PET-Flakes in einem Vakuumreaktor.

Nebenprodukte des PET-Recyclings sind ein Mahlgut aus den Verschlusskappen (HDPE) sowie Etikettenreste (ein Gemisch aus PE- und PP-Folien).

Gemäß den Angaben aus [GVM 2016] werden Rezyklate aus alten PET-Flaschen zu ca. 34 % für die Herstellung neuer Flaschen eingesetzt, weitere rund 27 % werden zu Industriefolien, ca. 23 % zu Textilfasern und rund 16 % zu sonstigen Produkten verarbeitet.

Rezyklatausbeute:

Angesichts der im angelieferten Ballen enthaltenen Verschlüsse, Produktreste, Folien (u.a. Etiketten) und anderen Fremdstoffen beträgt die PET-Ausbeute abzüglich weiterer Verluste durch die Aufbereitung maximal 75 % [GVM 2016].

Qualität der Rezyklate:

Beim PET-Recycling entscheidet die Kettenlänge der PET-Moleküle über den Anwendungsbereich. Die intrinsische Viskosität als relevanter Kennwert und Maß für das Molekulargewicht ist nachfolgend (Tabelle 9) für unterschiedliche PET-Qualitäten dargestellt.

Tabelle 9: Erforderliche intrinsische Viskosität von PET je Anwendungsbereich

Anwendungsbereich	IV-Index	Beispiele
Flaschen	0,78 – 0,85 dl/g	Flaschen für kohlenensäurehaltige Getränke
	0,70 – 0,78 dl/g	Flaschen für kohlenäurefreie Getränke
Folien / Tiefziehfolien	0,70 – 1,00 dl/g	PET-Folien für Thermoforming
	0,60 – 0,70 dl/g	Extrudierte PET-Folien
Fasern	0,72 – 0,98 dl/g	techn. Fasern (z. B. Umreifungsbänder)
	0,40 – 0,70 dl/g	Textilfaser

Quelle: nach [Kauertz et al. 2017]

Verbrauchskenngrößen:

Tabelle 10: Verbrauchskenngrößen der trocken-/nassmechanischen Aufbereitung von PET

Kennwert	
Stromverbrauch	500 kWh/Mg Input
Wasserbedarf	0,5 m ³ /Mg Input
Dieselbedarf für Mobilgeräte (z. B. Gabelstapler)	12 kWh/Mg Input (entspricht 1,2 l/Mg Input ¹⁰)

Quelle: [Meyer et al. 2009, Dehoust 2016]

2.2.4.3 Recycling von PVC

Im Jahr 2015 wurden in Deutschland etwa 73 Ma.-% der insgesamt verarbeiteten PVC-Menge zu Anwendungen im Baubereich und weitere 12 Ma.-% zu Verpackungen verarbeitet [Consultic (2016)]. PVC ist zu unterscheiden in Suspensions-PVC z. B. für Rohre und Fenster und Emulsions-PVC z. B. für Bodenbeläge. Wesentlicher Unterschied ist der Anteil an Weichmacher im PVC. PVC-Abfälle finden sich in den gemischten Bau- und Abbruchabfällen, in gemischten gewerblichen Abfällen, im Sperrmüll und auch in den LVP/WST-Sammelgemischen wieder. Im Rahmen der Sortierung dieser Abfallgemische wird PVC in der Regel als Störstoff abgetrennt und thermisch behandelt. Einzelne Anlagen separieren auch PVC-Bodenbeläge aus dem Sperrmüll und führen diese einer Verwertung zu. Für PVC-Fenster, -

¹⁰ Annahme: 1 Liter Diesel entspricht 9,9 kWh.

Bodenbeläge, -Dachbahnen und -Rohre existieren seit mehreren Jahren Rücknahmesysteme (Tabelle 11), die eine hochwertige Verwertung der Abfälle sicherstellen sollen.

Tabelle 11: Sammel- und Verwertungssysteme für Kunststoff-Bauprodukte

Recycling-Initiative	Handlungsbereich
Rewindo Deutschland	Fenster, Rollläden und Türen aus PVC
AgPR Arbeitsgemeinschaft PVC-Bodenbelag Recycling	Bodenbeläge und Belagsreste aus PVC
Roofcollect	Dach- und Dichtungsbahnen aus PVC
IVK Industrieverband Kunststoffbahnen e.V.	PVC-beschichtete Bahnen (z. B. beschichtete Planen für LKW's)
KRV Kunststoffrohrverband e.V.	Kunststoffrohre (PVC, PP, PE)

Exemplarisch werden nachfolgend die Aufbereitungsverfahren von PVC-Bodenbelägen und PVC-Fenstern beschrieben.

Die werkstoffliche Aufbereitung von separat erfassten alten PVC-Bodenbelägen unterscheidet sich von dem in Kapitel 2.2.1 beschriebenen Aufbereitungsverfahren insofern, dass eine nassmechanische Aufbereitung nicht stattfindet. Die über das Sammelsystem der AgPR erfassten PVC-Bodenbeläge werden in der Recyclinganlage der AgPR zu einem Feinmahlgut aufbereitet. Die Recyclinganlage der AgPR ist in Deutschland bislang die einzige Anlage für die Aufbereitung von PVC-Bodenbelägen. Die nachfolgenden Beschreibungen beziehen sich auf diese Anlage.

Die Aufbereitung beginnt mit einer händischen Sortierung, bei der Nicht-PVC-Bodenbeläge und andere Fremdstoffe aussortiert werden. Anschließend werden die Bodenbeläge grob zerkleinert (< 30 mm) und Eisenmetalle mit Hilfe von Magnetscheidern abgetrennt. Anschließend befreit eine Hammermühle die Bodenbelag-Chips von noch anhaftenden Estrich- und Kleberresten. Die mineralischen Reste werden abgesiebt (Fremdstoffabsiebung). Der Einsatz von Windsichtern dient der Entstaubung des aufzubereitenden Materials und ein nachgeschalteter Metallabscheider trennt noch enthaltene Metalle ab.

Dann folgt die sogenannte Kryogenvermahlung. Die PVC-Chips werden zunächst mittels flüssigen Stickstoffs auf eine Temperatur von minus 40°C gekühlt. Bei -30/-40°C erreicht PVC den Glaspunkt. Durch die Abkühlung verspröden die PVC-Chips und können so in der Feinmühle zu einem Pulver mit einem Partikeldurchmesser von maximal 0,4 Millimetern zermahlen werden. Mit Hilfe einer Filteranlage (Hydrozyklon) und einer weiteren Feinabsiebung wird das Feinmahlgut von Störstoffen und Korngrößen > 0,4 mm befreit. Die Störstoffe, hierzu zählen neben Estrich- und Kleberresten auch Textilfasern, bleiben unter dem Temperatureinfluss biegsam (verspröden nicht) und verknäueln auf den Transportbändern. Diese Knäule werden abgesiebt und extern entsorgt. Das erzeugte PVC-Pulver wird in Big Bags abgefüllt und u. a. an die Gesellschafter der AgPR geliefert, die daraus neue PVC-Bodenbeläge herstellen [AgPR (2015)].

Dem Altfensterrecycling geht die Demontage bei Rückbau- oder Sanierungsprojekten voraus. Die Altfenster werden komplett mit Glas¹¹, Beschlägen und Dichtungen zerkleinert. Es folgt die trockenmechanische Aufbereitung zur Abtrennung von Metallen und der Sortierung nach Korngröße gemäß Kapitel 2.2.1. Zur Abtrennung der Fremdstoffe Glas und Gummi kommen Luftsetztische und Lochplatten

¹¹ In Abhängigkeit der Annahmebedingungen der Altfensterrecycler sind Glasscheiben vorher zu entfernen.

zum Einsatz [VEKA 2017]. Bei der Trennung mit Hilfe eines Luftsetztisches (auch Luftherd oder Fließbettseparator genannt) wird sich wie bei den nassmechanischen Verfahren die unterschiedliche Dichte der Bestandteile zunutze gemacht. Das zugeführte Materialgemisch wird zunächst durch die Luft, die durch die Tischfläche strömt, fluidisiert. Hierbei schichtet sich das Material gemäß seiner Dichte und die leichteren Bestandteile wandern aufgrund der stärkeren Fluidisierung und der geringen Reibung abwärts. Das schwere Material hingegen wird in Steigungsrichtung des Tisches nach oben transportiert [Kranert; Cord-Landwehr 2010]. Alternativ dazu können Gummidichtungen und andere Weich-PVC-Bestandteile sowie Metallteile mittels materialspezifischer elektrostatischer Separation getrennt werden.

Das PVC-Mahlgut wird auf eine einheitliche Korngröße von wenigen Millimetern gebracht, gewaschen und vollautomatisch nach Farbe der Partikel sortiert. Im letzten Schritt erfolgt, wie in Kapitel 2.2.1 beschrieben, die Schmelzefiltration und Granulierung des gereinigten PVC-Mahlgutes [VEKA (2017)].

Rezyklatausbeute:

Laut dem Rücknahmesystem Rewindo werden ausgehend vom reinen PVC-Anteil in erfassbaren verfügbaren Altfenstern, -rolläden und -türen etwa 89 % (Stand 2016) im Rewindo-System zu Rezyklat aufbereitet [Rewindo 2016].

Qualität der Rezyklate:

Für PVC-Fensterprofile, PVC-Fußbodenbeläge, PVC-Rohre sowie -Behälter und -Folien ist der K-Wert nach Fikentscher (DIN EN ISO 1628-2:1999-11) ein wichtiges Qualitätsmerkmal. Mit steigendem K-Wert verbessern sich die mechanischen Eigenschaften (Reißdehnung, Shorehärte, Schlagzähigkeit), gleichzeitig steigt jedoch die Viskosität der Schmelze und erschwert die Verarbeitung [Waller 2003]. Für die thermoplastische Verarbeitung von PVC decken K-Werte einen Bereich von 57 bis 73 ab. Anwendungsbeispiele unterschiedlicher K-Werte zeigt Tabelle 12 [Attenberger et al. 2011, Schellerer et al. 2017].

Tabelle 12: Anwendungsspezifische K-Werte für PVC (exemplarisch)

K-Wert	Anwendungsbeispiele PVC
57 bis 60	Hartfolien, dünnwandige Profile, Spritzgussanwendungen
60 bis 70	Rohre, Profile
65 bis 80	Kabel, Schläuche

Quelle: [Attenberger et al. 2011, Schellerer et al. 2017]

Verbrauchskenngrößen:

Beim Recycling von PVC liegt der Stromverbrauch bei ungefähr 500 bis 600 kWh/Mg Inputmaterial [Lindner; Hoffmann 2015].

2.2.4.4 Recycling von PS

Polystyrol wird beispielsweise in Elektrogeräten (maßgeblich Gehäuse) oder als Lebensmittelverpackung (Joghurtbecher) eingesetzt. Die beim Recycling entstehenden PS-Rezyklate werden zur Herstellung von Pflanzenpaletten, Büroablagen und Kleiderbügeln verwendet. Aus dem EAG-Bereich gewonnene PS-/ HIPS-Rezyklate kommen auch bei der Herstellung neuer Elektrogeräte zum Einsatz.

Die Aufbereitung von PS erfolgt nach dem in Kapitel 2.2.1 dargestellten Standardverfahren. Zur Reinigung der PS-Fraktion wird zunächst eine höhere Trenndichte eingestellt, sodass PS in der Schwimmfraktion ausgetragen wird. Um leichtere Fremdkunststoffe (PE, PP) zu entfernen, erfolgt eine weitere

Dichtentrennung in Wasser. PS wird nun als Sinkfraktion ausgetragen. Es schließen sich die in Kapitel 2.2.1 dargestellten Verfahrensschritte an.

Rezyklatausbeute:

Die Rezyklatausbeuten liegen bei der Aufbereitung von PS-Fractionen bei rund 87 % [Dehoust et al. 2016].

Qualität der Rezyklate:

Tabelle 13: Qualität der PS-Rezyklate (exemplarisch)

Kennwert	Einheit	PS-Rezyklat
Herkunft	-	Joghurtbecher
MFR 200°C/5 kg	g/10 Min	5,5
Kerbschlagzähigkeit Charpy 23°C	kJ/m ²	4 – 8,5
Kerbschlagzähigkeit Charpy -20°C	kJ/m ²	2,4 – 4,3
Zug-E-Modul	MPa	1900 - 2200
Bruchdehnung	%	14 - 23
Zugfestigkeit	MPa	-
Shore-Härte (D)	-	70 - 73
Farbe	-	schwarz
Verarbeitungsverfahren lt. Hersteller	-	Spritzguss, Extrusion
Einsatzgebiet lt. Hersteller	-	Tiefziehplatten, Möbelement, Wickelspulen, Pflanzenpaletten, Büroablagen, Kleiderbügel

Quelle: Produktdatenblätter Kunststoffaufbereiter

Verbrauchskenngrößen:

Der Strombedarf bei der Aufbereitung von PS liegt bei ca. 400 bis 500 kWh/Mg Inputmaterial. Der Wasserverbrauch beträgt rund 0,5 m³/Mg Inputmaterial [Dehoust et al. 2016].

2.2.4.5 Recycling von Folien

Folien (überwiegend LDPE) fallen als Sortierfraktion nach der Erstbehandlung von LVP-/WST-Gemischen, gemischten gewerblichen Siedlungsabfällen und gemischten Bau- und Abbruchabfällen an. Bei den Folien aus der LVP-/WST-Sortierung handelt es sich um großformatige Folien (> DIN A4) aus der Fraktion > 220 mm (vgl. Kapitel 2.1.1). Bei den händisch aussortierten Folien aus der Sortierung von gemischten gewerblichen Siedlungsabfällen und gemischten Bau- und Abbruchabfällen handelt es sich ebenfalls um großformatige Folien, während eine mit NIR-Trenntechnik aussortierte Folienfraktion aus den Abfallströmen kein charakteristisches Format aufweist [Dehne et al. 2015].

Eine weitere Anfallstelle ist mit zunehmender Bedeutung der Bereich der Agrarfolien. Seit dem Jahr 2014 existiert in Deutschland ein Rücknahmesystem für Landwirtschaftsfolien/Erntekunststoffe namens ERDE (Sammelmenge 2016: rund 5.400 Mg). Landwirtschaftsfolien werden unterschieden in LDPE-Folien (Flachsilofolien, Unterziehfolien, Siloschläuche) und LLDPE-Folien (Silagestretchfolien, Netzersatzfolien). Trotz der Annahmebedingung „besenrein“ zeigt sich in der Praxis ein hoher Verschmutzungsgrad an organischen und mineralischen Bestandteilen. Das sehr flexible und dünne Mate-

rial (Folienstärken im Bereich von 25 bis 100 µm) macht die Folienaufbereitung (zerkleinern, separieren, reinigen) generell sehr aufwendig [Hoffmann 2013].

Die Aufbereitung verläuft grundsätzlich analog dem in Kapitel 2.2.1 beschriebenen Verfahren, beinhaltet jedoch eine vor der Nasszerkleinerung vorgeschaltete Wäsche, um insbesondere Papieranhaftungen und andere Störstoffe (kleine Metallteile, Steine) weitestgehend zu entfernen. Mit einem patentierten Verfahren (HydroDyn), das bereits großtechnisch eingesetzt wird, können u.a. stark verschmutzte dünne Folien mit einer hydrodynamischen Friktionswäsche nahezu rückstandsfrei gereinigt werden. Das Verfahren zeichnet sich durch einen deutlich geringeren Energiebedarf bei gleichzeitig höherer Reinigungswirkung aus.

Das Gutmaterial der Aufbereitung sind die Polyolefine (PP und PE), die bei der Dichtentrennung als Schwimmfraktion ausgetragen werden. Für die Dichtentrennung kommen überwiegend Hydrozyklone (Kapitel 2.2.1) zum Einsatz. Im Anschluss an die Trocknung werden die Folien-Flakes agglomeriert oder zu Regranulaten aufbereitet.

Rezyklatausbeute:

Beim Recycling von Folien sind Ausbeuten von rund 70 % Stand der Technik in Deutschland [Dehoust et al. 2016]. In Abhängigkeit vom Verschmutzungsgrad kann die Ausbeute insbesondere bei der Aufbereitung von Agrarfolien niedriger sein.

Qualität der Rezyklate:

Tabelle 14: Qualität der Folien-Rezyklate (exemplarisch)

Kennwert	Einheit	Folien-Rezyklat (LDPE/HDPE)
Herkunft	-	Verpackungsfolien, Tüten
MFR 190°C/2,16 kg (Folienprüfung)	g/10 Min	0,5 – 0,8
MFR 190°C/5 kg (Rohrprüfung)	g/10 Min	1,9 – 2,2
Kerbschlagzähigkeit Charpy 23°C	kJ/m ²	22 - 60
Kerbschlagzähigkeit Charpy -20°C	kJ/m ²	3,4 – 4,5
Zug-E-Modul	MPa	<300 – 400 (LDPE), 600 – 850 (HDPE)
Bruchdehnung	%	> 250
Zugfestigkeit	MPa	15- 20
Farbe	-	transparent, bunt, schwarz
Verarbeitungsverfahren lt. Hersteller	-	Extrusion
Einsatzgebiet lt. Hersteller	-	Rohre, Abstandfolie, Wellrohre

Quelle: Produktdatenblätter Kunststoffaufbereiter

Verbrauchskenngrößen:

Der Energiebedarf beim Folienrecycling schwankt stark und liegt bei der Aufbereitung zur Agglomeration bei rund 400 kWh/Mg und bei der Folienaufbereitung zur Regranulierung bei rund 1.100 kWh/Mg Inputmaterial. Der Wasserverbrauch beträgt ca. 0,5 m³/Mg Inputmaterial [Dehoust et al. 2016].

2.2.4.6 Recycling von Kunststoffen der Schredderleichtfraktion

Bei der Aufbereitung von Altfahrzeugen und EAG fällt eine kunststoffhaltige Schredderleichtfraktion an (Kapitel 2.1.3, Kapitel 2.1.4), die in sogenannten Post-Schredder-Verfahren zu einem Kunststoffkonzentrat aufbereitet werden. Dieses Konzentrat enthält überwiegend schwarze Kunststoffe und ist hinsichtlich der Kunststoffsorten sehr heterogen – bis zu 60 Kunststoffe enthält ein Kunststoffkonzentrat aus der EAG-Aufbereitung [Köhnlechner 2014].

Aufgrund beispielsweise des komplexen Aufbaus der Kunststoffe, der schwer trennbaren Verbunde sowie des Einsatzes von Flammschutzmitteln ist die Verwertung von Kunststoffen aus EAG und Altfahrzeugen vergleichsweise aufwendig. Kunststoffe mit durch POP-Verordnung geregelten bromierten Flammschutzmitteln oberhalb der festgelegten Grenzwerte dürfen beispielsweise nicht werkstofflich verwertet werden. Wenn nur ein Teil eines Produktes oder Abfalls, wie ein Altgerät, persistente organische Schadstoffe enthält oder mit diesem verunreinigt ist, so muss dieser abgesondert und dann gemäß der POP-Verordnung entsorgt werden. Wann diese Separation in der Behandlungskette erfolgen muss, ist nicht festgelegt. Vor diesem Hintergrund enthält das Kunststoffkonzentrat noch Kunststoffe mit (bromierten) Flammschutzmitteln.

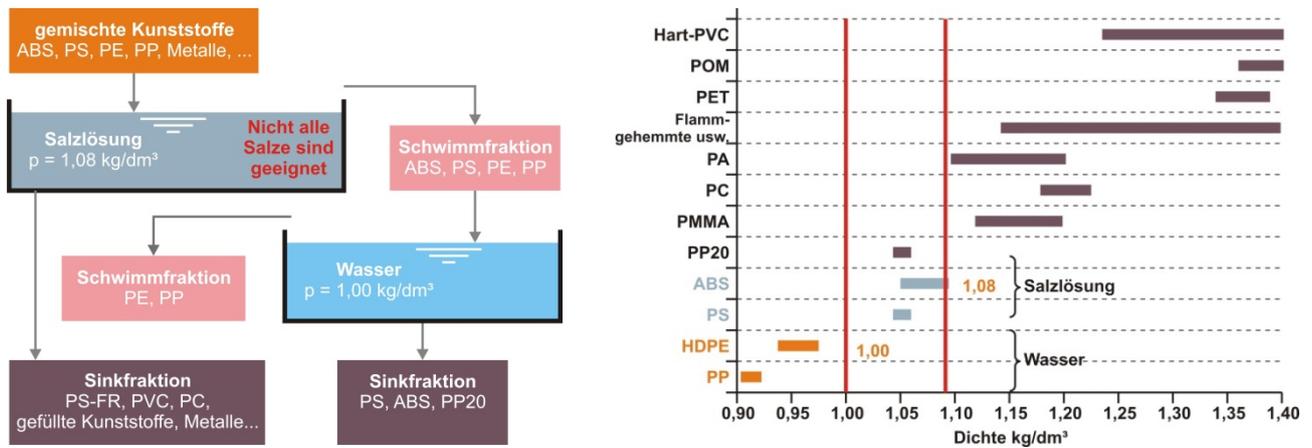
Die Kunststoffkonzentrate durchlaufen in abweichender Reihenfolge die in Kapitel 2.2.1 dargestellten Prozessschritte. Die Sortierung der Kunststoffkonzentrate zielt auf die mengenmäßig relevanten Kunststoffe. Diese sind ABS, PS und PP. Aufgrund sich überlappender Dichtebereiche (z. B. ABS/PS 1,04 bis 1,05 g/cm³) können mittels Dichtentrennung im nassen Medium keine sortenreinen Fraktionen erzeugt werden. Zudem enthält das aufzubereitende Kunststoffgemisch größtenteils Ruß geschwärzte Teile. Weder eine Schwimm-Sink-Trennung noch der Einsatz von NIR-Trenntechnik ist somit zielführend.

Das Kunststoffgemisch (< 35 mm) wird nach einer trockenmechanischen Abtrennung von Störstoffen – u.a. Staub, Folienreste, Papierreste, Faser- und Schaumstoffreste (analog Kapitel 2.2.1) – einer nassen Dichtentrennung unterzogen. Diese erfolgt in zwei Schritten (Abbildung 19). Zunächst werden in einer Salzlösung (Dichte 1,08 g/cm³) die Zielkunststoffe von weiteren Störstoffen wie bspw. Holz, Metalle, Sand und schwerere Kunststoffe abgetrennt. Die Zielkunststoffe schwimmen auf, die Störstoffe sinken ab. In der Sinkfraktion befinden sich auch Polymere der Zielkunststoffe, die aufgrund enthaltener Flammschutzmittel oder Füllstoffe schwerer sind als der jeweilige reine Kunststoff. Diese Sinkfraktion wird energetisch verwertet.

Die Schwimmfraktion wird ein weiteres Mal einer Dichtentrennung unterzogen. Das Trennmedium ist Wasser (Dichte 1,0 g/cm³). ABS und PS werden als Sinkfraktion ausgetragen (entspricht zusammen mit PP20¹² etwa 50 % vom Input), PP und PE bilden die Schwimmfraktion (etwa 5 % vom Input) [Köhnlechner 2014].

¹² PP TV 20 (kurz PP20): Polypropylen mit 20 % Talkum, Talkum führt zu höherer Dichte

Abbildung 19: Dichtentrennverfahren für Kunststoffkonzentrate aus der EAG-Aufbereitung und Dichtebereiche der enthaltenen Kunststoffe (links) und Kunststoffmodifikationen (rechts)

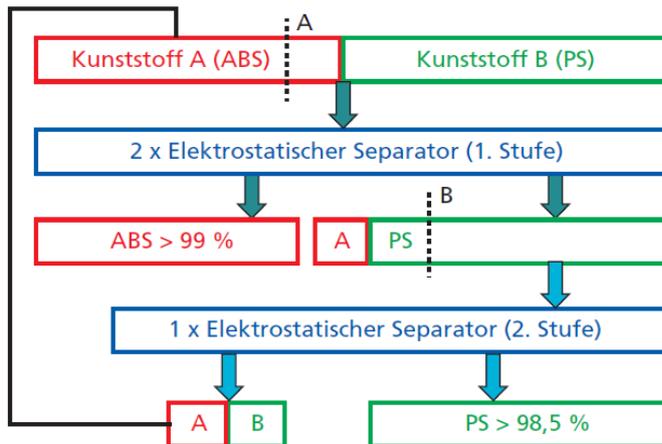


Quelle: Köhnlechner 2014

Im Anschluss an einen Trocknungs- und einen Zerkleinerungsschritt (< 10 mm) liegen zwei Fraktionen vor, die überwiegend schwarze Kunststoffe enthalten. Da optische Separationsverfahren bei Ruß geschwärzten Kunststoffen an ihre Grenzen stoßen, kommen elektrostatische Separationsverfahren zum Einsatz (siehe Abbildung 20, analog für die Trennung PP und PE). Bei der elektrostatischen Separation wird die unterschiedliche Aufladung der Kunststofffraktionen in einer Aufladeeinheit genutzt. Unterschiedlich geladene Kunststoffe können nach der Aufladung im Elektrodensystem abgetrennt werden, indem positiv geladene Partikel durch eine negative Elektrode und negativ geladene Partikel durch eine positive Elektrode angezogen werden [MSV 2012].

Die überwiegend schwarzen Kunststoffe werden, wie in Abbildung 20 skizziert, durch mehrere Stufen der elektrostatischen Separation aufgeteilt [Köhnlechner 2013]. Neben der Trennung der Zielpolymer erfolgt vorab mit entsprechend ausgerichteten Aggregaten die elektrostatische Abtrennung von ggf. noch enthaltenen Anteilen Holz und Gummi. Das Material wird selektiv getrocknet. Die Kunststoffoberfläche trocknet schneller als die von bspw. Holz. Holz und andere leitfähige Störstoffe können somit von den Kunststoffen separiert werden. Mit dieser Aufbereitungstechnologie werden gemäß Herstellerangaben hohe Reinheiten von mehr als 98 % erzeugt. Noch enthaltene Verunreinigungen werden durch Schmelzfiltration weitestgehend entfernt. Die elektrostatische Separation erzielt optimale Ergebnisse bei Gemischen mit zwei Komponenten, was eine vorhergehende nasse Dichtentrennung in jedem Fall erforderlich macht [Köhnlechner 2013].

Abbildung 20: Elektrostatische Separation



Quelle: Köhnlechner 2013

Rezyklatausbeute:

Bezogen auf den Input schwankt die Ausbeute über alle Rezyklate zwischen 40 und 60 %. Im Umkehrschluss fallen 40 bis 60 % als Sortierrest an (Verunreinigungen, gefüllte und flammgeschützte Kunststoffe). Die Ausbeuten der Aufbereitung von Kunststoffen aus IT-Equipment liegen aufgrund des hohen Anteils an Flammenschutzmitteln in den Kunststoffen bei etwa 30 bis 35 %. Aus Haushaltskleingerät Kunststoffen mit einem geringen Anteil an Flammenschutzmitteln lassen sich Ausbeuten von mehr als 50 % generieren [Köhnlechner o.J.].

Qualität der Rezyklate:

Konkrete Informationen zu Qualitätskenngrößen der Rezyklate aus der EAG-Aufbereitung liegen nicht vor.

Verbrauchskenngrößen:

Konkrete Informationen zu Verbrauchskenngrößen für die Aufbereitung von EAG-Kunststoffen liegen nicht vor.

2.2.4.7 Recycling von Mischkunststoffen (LVP)

Die Zusammensetzung der Mischkunststofffraktion ist unmittelbar abhängig von der vorhergehenden Sortierung des LVP-Gemisches. Der Fokus der LVP-Sortierung liegt in der Abtrennung formstabiler Standardkunststoffe, insofern sind Folien, insbesondere Folien < DIN A4, ein wesentlicher Bestandteil der Mischkunststofffraktion. Sie machen einen Anteil von etwa 20 bis 30 Ma.-% aus und setzen sich zu mehr als 95 Ma.-% aus den Kunststoffen PE und PP zusammen.

Die Aufbereitung von Mischkunststoffen zur werkstofflichen Verwertung erfolgt überwiegend trockenmechanisch und zielt auf die Herstellung von Mischkunststoffagglomeraten ab. Die Aufbereitung umfasst die in Kapitel 2.2.1 beschriebenen Prozessschritte der trockenmechanischen Aufbereitung (Zerkleinerung, Siebung, Magnetscheidung, Windsichtung). Diese dienen der Abtrennung eisenhaltiger Störstoffe sowie u.a. von Glas und Steinen.

In Abhängigkeit der Qualität (Zusammensetzung, Störstoffgehalt) der Mischkunststofffraktion erfolgt zum Teil auch eine nassmechanische Aufbereitung gemäß Kapitel 2.2.1 zu Agglomeraten oder sogar Regranulaten [Dehoust, Christiani 2012]. Dieses Vorgehen zielt insbesondere auf eine Anreicherung der Polyolefine (PE und PP) ab.

Rezyklatausbeute:

Die Qualität der Mischkunststofffraktion, also der Anteil an Störstoffen wie Etiketten, Lebensmittelanhaftungen, Feuchtigkeit, aber auch bestimmte Kunststoffe (z. B. Misch-PET, PVC), hat neben dem Aufbereitungsziel (Mischkunststoff-Agglomerat, Polyolefin(PO)-Agglomerat, Regranulat) großen Einfluss auf die Rezyklatausbeute. Mit ca. 40 bis 60 % ist die Ausbeute vergleichsweise gering [Dehoust et al. 2016; Dehoust, Christiani 2012].

Tabelle 15: Rezyklatausbeute Mischkunststoffe (LVP)

Rezyklattyp	Ausbeute
Mischkunststoff-Agglomerat	66,5%
PO-Agglomerat	45%
Mischkunststoff-Regranulat	46%

Quelle: nach [Dehoust et al. 2016]

Qualität der Rezyklate:

Aussagekräftige Informationen zu Qualitätskenngrößen der Mischkunststoff-Rezyklate liegen nicht vor.

Verbrauchskenngrößen:

Tabelle 16: Verbrauchskenngrößen der Aufbereitung von Mischkunststoffen (LVP)

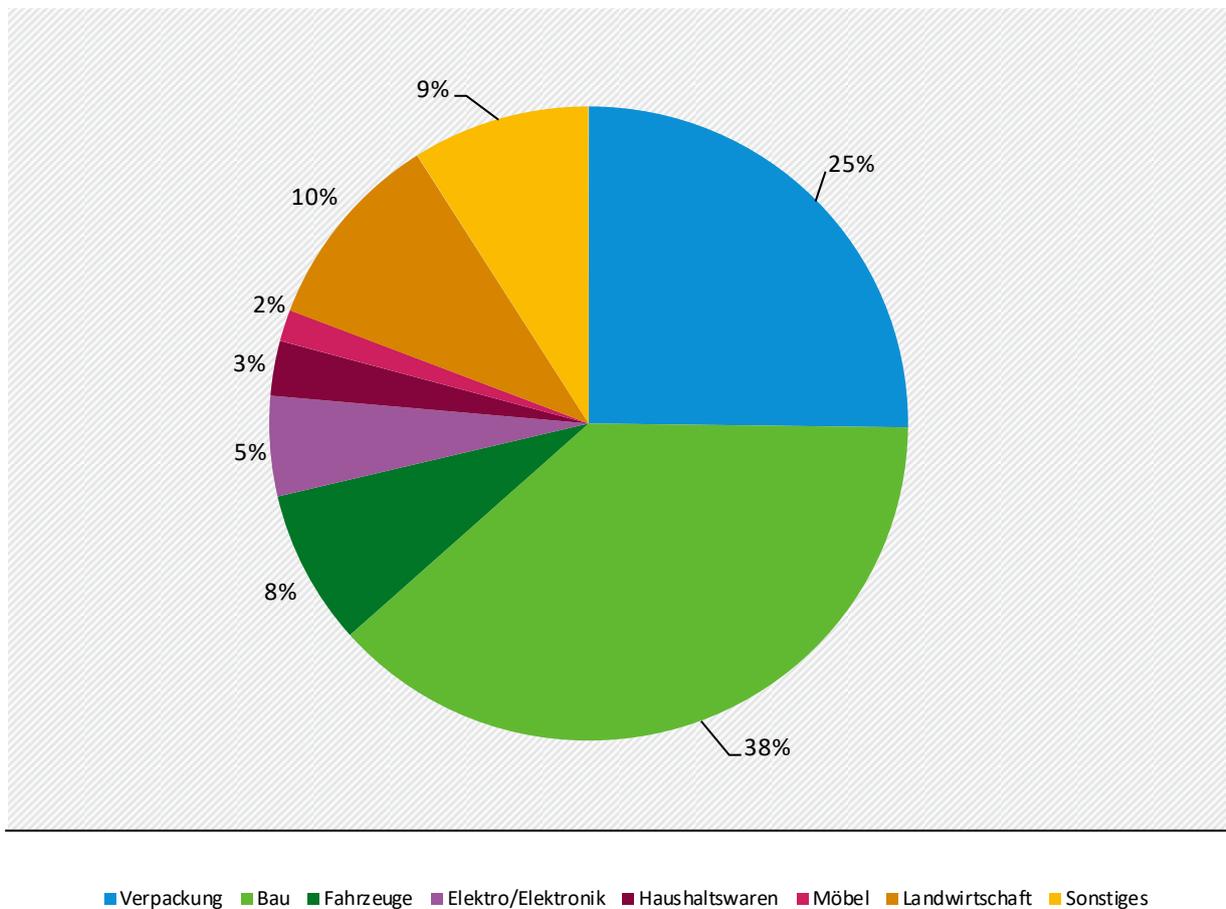
Rezyklattyp	Stromverbrauch	Wasserbedarf
Mischkunststoff-Agglomerat	350 kWh/Mg Input	-
PO-Agglomerat	570 kWh/Mg Input	4.500 kg/Mg Input
Mischkunststoff-Regranulat	580 kWh/Mg Input	4.500 kg/Mg Input

Quelle: nach [Dehoust et al. 2016]

2.3 Stand der Technik der Rezyklatanwendungen

Kunststoffrezyklate können in Abhängigkeit ihrer Qualität mit Hilfe verschiedener Verarbeitungsverfahren in den unterschiedlichsten Anwendungen zum Einsatz kommen. Abbildung 21 zeigt für das Jahr 2015 den Rezyklateinsatz je Einsatzbereich. Diese Darstellung umfasst sowohl Rezyklate aus dem Post-Consumer-Bereich als auch Rezyklate, die aus Produktionsabfällen erzeugt wurden. Der Großteil der Rezyklate wird im Baubereich (38 %) und für Verpackungen (25 %) eingesetzt. Die restlichen 37 % verteilen sich auf die Bereiche Elektro/Elektronik, Fahrzeuge, Haushaltswaren, Landwirtschaft, Möbel und Sonstiges [Consultic 2016].

Abbildung 21: Rezyklateinsatz je Einsatzbereich im Jahr 2015



Angaben in Ma.-%

Quelle: Eigene Darstellung nach Consultic 2016

2.3.1 Ausgewählte Produktbeispiele mit Kunststoffrezyklatanteil

Für die Darstellung des Standes der Technik hinsichtlich des Rezyklateinsatzes waren Produktbeispiele zu recherchieren, bei deren Herstellung Kunststoffrezyklate aus Post-Consumer-Abfällen eingesetzt werden. Der Rezyklatanteil im Produkt, die Anforderungen an die Rezyklatqualität und das Verarbeitungsverfahren waren ebenfalls Bestandteil der Recherchen.

Bei der Auswahl der Beispielprodukte standen folgende Kriterien im Fokus:

- ▶ Das Spektrum der maßgeblich verarbeiteten Kunststoffsorten wird wiedergespiegelt.
- ▶ Das Spektrum der Branchen (Verpackungen, Kfz, Bau etc.) wird abgedeckt.
- ▶ Exoten, d.h. Produkte ohne Massenrelevanz, bleiben unberücksichtigt.
- ▶ Das Produktspektrum soll sowohl höherwertige Produkte als auch dickwandige Produkte mit ihren unterschiedlichen Anforderungen an das Rezyklat umfassen.
- ▶ Das Spektrum der unterschiedlichen Verarbeitungstechniken wird abgedeckt.

Die nachfolgenden Informationen basieren auf Herstellerangaben - insbesondere aus Pressemitteilungen, Produktbeschreibungen, Unternehmenshomepages und Präsentationen von Produktherstellern bzw. -anwendern – sowie Expertenbefragungen. Nicht für jedes Beispiel konnten auf diese Weise vollständige und insbesondere detaillierte Angaben recherchiert werden.

Problematisch ist die Beantwortung der Frage nach der Rezyklatqualität, da diese spezifisch für das jeweilige Produkt ist. Konkrete Nachfragen an einzelne Hersteller konnten die genannten Lücken nicht schließen. Aus Wettbewerbsgründen sind diese sensiblen Informationen nicht verfügbar.

Die nachfolgende Tabelle fasst die Rechercheergebnisse zusammen. Hieraus ist zu entnehmen, welche Kunststoffrezyklaten für die Herstellung der Beispielprodukte eingesetzt werden und welche Verarbeitungsverfahren standardmäßig jeweils zum Einsatz kommen.

Für die Rezyklat-Einsatzbereiche Bauwirtschaft, Verpackungen, Haushalt, Büroartikel, Textilien, Elektrogeräte und Fahrzeuge wurden insgesamt 29 Produktbeispiele recherchiert.

Tabelle 17: Produktbeispiele mit Rezyklateinsatz

Ifd. Nr.	Kunststoffsorte/ Rezyklat	Einsatzbereich	Produkt	Verarbeitungsverfahren	Rezyklatanteil in %	Rezyklatherkunft Herstellerangaben
1	PE/PP	Bauwirtschaft	Drainagegitter / Rasengitter	Spritzguss	100	Verpackungsabfälle aus dem dualen System
2	PE/PP	Bauwirtschaft	Entwässerungsrinnen	Extrusion/Spritzguss	≥ 80	Verpackungsabfälle aus ganz Europa
3	PE/PP	Bauwirtschaft	Wellrohre	Profilextrusion	bis zu 70	Verpackungsabfälle aus dem Dualen System
4	PE/PP	Bauwirtschaft	Folien	Blasfolienextrusion	bis zu 100	z. B. Rücknahmesystem ERDE
5	PE/PP	Bauwirtschaft	Kabelkanäle für Außenbereich	Extrusion/Spritzguss	k.A.	Produktionsreste und alte Kabelrohre
6	PVC	Bauwirtschaft	Fensterprofile	Profilextrusion	40 - 75	PVC-Profilabschnitte und PVC-Späne, die beim Verarbeiter bzw. dem Fensterbauer anfallen. PVC-Altfensterprofile
7	PVC	Bauwirtschaft	Rohre	Extrusion	k.A.	k.A.
8	Mischkunststoff	Bauwirtschaft	Bakenfußplatten	Extrusion/Spritzguss	bis zu 100	Verpackungsabfälle aus dem dualen System
9	PE/PP	Verpackungen	Wasch- / Reinigungsmittelflaschen	Extrusionsblasen/ Stretchblasformen	30 bis 100	Verpackungsabfälle aus dem dualen System
10	PET	Verpackungen	Wasch- / Reinigungsmittelflaschen	Extrusionsblasen/ Stretchblasformen	bis zu 100	z. B. 80 % PET-Pfandflaschen und 20 % PET-Verpackungsabfälle aus dem dualen System
11	PET	Verpackungen	Umreifungsbänder	Profilextrusion	bis zu 100	PET aus Flaschensammlung, gebrauchte PET-Bänder

lfd. Nr.	Kunststoffsorte/ Rezyklat	Einsatzbereich	Produkt	Verarbeitungsverfahren	Rezyklatanteil in %	Rezyklatherkunft Herstellerangaben
12	PET	Verpackungen	PET-Getränkeflaschen	Spritzguss (Preform)/ Stretchblasen	50 - 100	PET aus Flaschensammlung
13	PE/PP	Haushalt/Garten	Teichwannen	Spritzguss/ Extrusion & Tiefziehen	k.A.	k.A.
14	PET	Haushalt/Garten	Schmutzfangmatten	Spritzguss	50 - 90	PET aus Flaschensammlung
15	PE/PP	Haushalt/Garten	Blumenkästen/Blumentöpfe	Spritzguss	100	überwiegend Verpackungsabfälle aus dem dualen System
16	PE/PP	Haushalt/Gewerbe	Müllgroßbehälter	Spritzguss	50	Altbehälter, post-consumer Rezyklate
17	PS	Büroartikel	Sammelordner	Extrusion	100	k.A.
18	PS	Büroartikel	Ablagen	Spritzguss	≥ 80	aus dem Kühlschranksrecycling
19	ABS	Büroartikel	Gehäuse von Lochern	Spritzguss	80	post-consumer-Kunststoffe
20	PET	Textil	Vliesbekleidung	Faserextrusion	100	z. B. 65% aus PET-Flaschen und 35% aus Industriewertstoffen (PET)
21	PET	Textil	Füllmaterialien	Faserextrusion	k.A.	k.A.
22	PC/PET	Elektrogeräte	Kunststoffgehäuse von Druckern/Kopierern	Spritzguss	40	PET-Flaschen und recyceltes Polycarbonat z. B. aus Wasserspendern
23	PP oder ABS	Elektrogeräte	Kunststoffgehäuse von Staubsaugern	Spritzguss	55	post-consumer ABS, HIPS und PP aus EAG-Kunststoffen
24	PP oder ABS	Elektrogeräte	Kunststoffgehäuse von Kaffeemaschinen	Spritzguss	50	k.A.
25	PE/PP	Fahrzeug	Halterungen für Kfz-Kennzeichen	Spritzguss	k.A.	k.A.

Ifd. Nr.	Kunststoffsorte/ Rezyklat	Einsatzbereich	Produkt	Verarbeitungsverfahren	Rezyklatanteil in %	Rezyklatherkunft Herstellerangaben
26	PE/PP	Fahrzeug	Wasserabweiser	Spritzguss	k.A.	k.A.
27	PP/EPDEM	Fahrzeug	Radlaufschale	Spritzguss	k.A.	entlackte, demontierte Altstoßfänger
28	PP/EPDEM	Fahrzeug	Kühlergrill	Spritzguss	k.A.	k.A.
29	PA (PA 6.6)	Fahrzeug	Radkappen	Spritzguss	k.A.	k.A.

2.3.2 Verarbeitungsverfahren

Rezyklate werden mit den gleichen Verfahren verarbeitet wie Primärware. Ausschlaggebend für das zum Einsatz kommende Verfahren sind die Applikation selbst und die Beschaffenheit der Rezyklate. Im Rezyklat enthaltene Fremdstoffe (u.a. Glassplitter, Metalle) können die nachgeschaltete Anlagentechnik schädigen und Fremdkunststoffe können aufgrund unterschiedlicher Schmelzpunkte zu Fehlstellen im Produkt führen. Durch die Zugabe von Rezyklaten zur Primärware können sich außerdem die Eigenschaften der Kunststoffschmelze (Fließfähigkeit) ändern, was wiederum z. B. bei Spritzgussanwendungen zu sogenannten Einfallstellen oder Überspritzungen am Endprodukt führen kann und damit zur Erhöhung der Ausschussrate [Kruppa 2017]. Für die Anwender ist die Rezyklatbeschaffenheit ausschlaggebend für die Auswahl und die Auslegung der Verarbeitungstechnik. Zum Beispiel können zusätzlich vorgeschaltete Filter die Schmelze nochmals reinigen, verschleißbeständige Materialien Anlagenteile schützen [VDMA 2017].

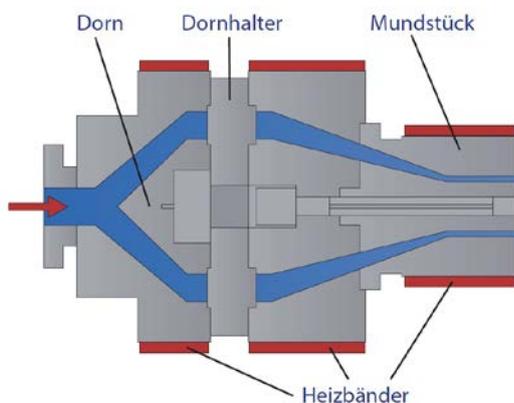
Nachfolgend werden die Standardverfahren der Kunststoffverarbeitung (Spritzguss und Extrusion) beschrieben.

2.3.2.1 Extrusion

Der Ablauf der Extrusion wurde in Kapitel 2.2.1 bereits kurz beschrieben. Für die Verarbeitung von Kunststoffen kommen überwiegend Einschneckenextruder zum Einsatz. Doppelschneckenextruder mit gleichlaufenden Schnecken werden zunehmend auch in der kunststoffverarbeitenden Industrie eingesetzt. Nach der Plastifizierung der Schmelze und dem Druckaufbau wird der sogenannte Extrudatstrang durch ein an den Extruder angeflanshtes Extrusionswerkzeug gepresst und geformt. Je nach Wahl des Werkzeuges entstehen entweder Rohre, Profile, Platten oder Folien. Es gibt aber auch Ummantelungswerkzeuge, die beispielsweise für die Produktion von Kabeln verwendet werden [Michaeli 2010]. Faktoren, die auf die Formgebung des Extrudatstrangs einwirken, sind die Abkühlgeschwindigkeit, die Abzugskraft, die Strangaufweitung sowie die Relaxationsvorgänge in der Schmelze [Bonten 2014].

Für die Herstellung verschiedener Produkte müssen verschiedene Extrusionswerkzeuge eingesetzt werden. Für die Produktion von Rohren wird beispielsweise ein spezielles Rohr-Extrusionswerkzeug genutzt. Dieses besitzt einen Dorn, um welchen die Schmelze beim Durchfluss durch das Werkzeug radial herumläuft (siehe Abbildung 22). Die Schmelze tritt in das Werkzeug ein, umläuft radial den Dorn und erreicht die Austrittsform im Bereich des Mundstücks [Bonten 2014].

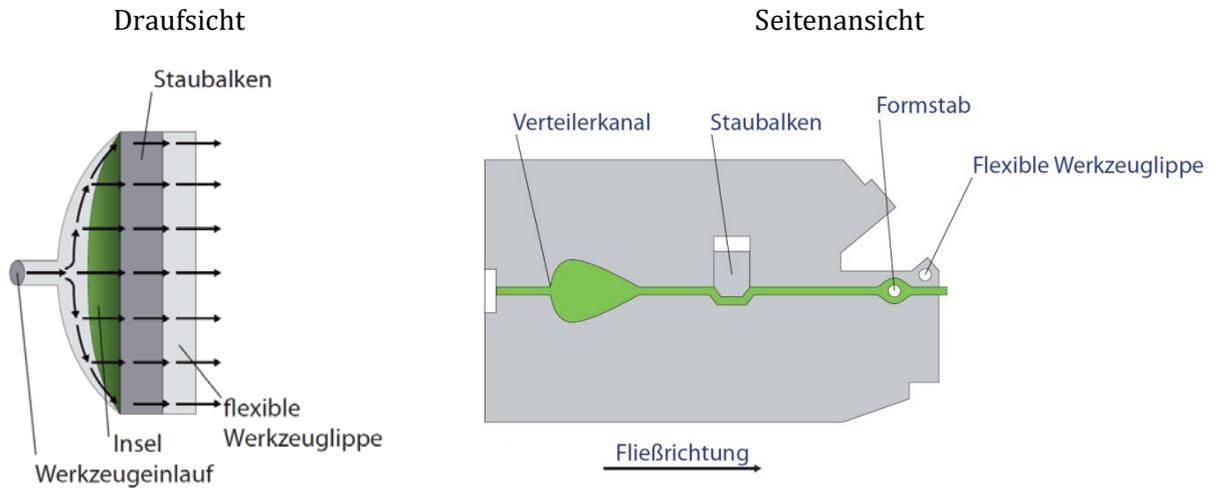
Abbildung 22: Extrusionswerkzeug für Rohre



Quelle: Bonten 2014

Für die Produktion von Folien oder Platten werden Breitschlitzdüsen verwendet. Die Schmelze aus dem Extruder gelangt in den kleiderbügelförmigen Verteilerkanal (siehe Abbildung 23, Draufsicht), der eine gleichmäßige Verteilung der Schmelze in die Breite gewährleistet. Bei der Folienherstellung folgen zur Glättung und Streckung der Folien nach dem Extruder noch mehrere Walzen [Bonten 2014].

Abbildung 23: Breitschlitzwerkzeug



Quelle: Bonten 2014

Bei der Blasfolienextrusion können sehr dünne und breite Folien hergestellt werden. Hierbei wird ein Schmelzeschlauch durch ein ringförmiges Werkzeug nach oben gefördert. Der Schmelzeschlauch tritt im thermoplastischen Zustand aus der Ringöffnung des Werkzeugs aus und wird mit Stützluft aufgeblasen. Die Schmelzblase wird mit Hilfe von Luft (bzw. Wasser) gekühlt. Anschließend wird die Folie durch ein Quetschwalzenpaar zusammengelegt [Bonten 2014].

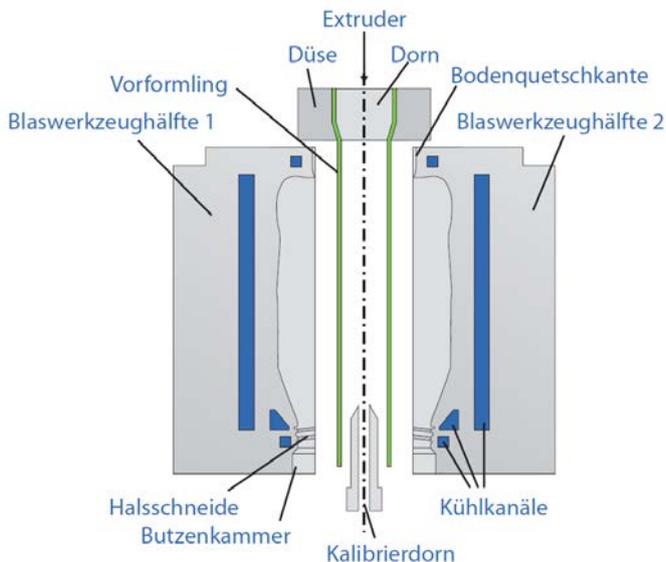
Abbildung 24: Blasfolienextrusion



Quelle: Windmüller & Hölscher 2013

Neben der Rohr-, Folien- und Blasfolienextrusion gibt es auch das Blasformen. Durch dieses Verfahren können Hohlkörper, wie Flaschen, Tanks oder Kanister, hergestellt werden. Der Kunststoff wird zunächst extrudiert und zu einem Schlauch geformt. Im Anschluss wird dieser Schlauch nach unten auf den Kalibrierdorn herabgelassen (siehe Abbildung 25). Durch Luftdruck wird der Schlauch in das vorgeformte Extrusionswerkzeug geblasen. Der Kunststoff nimmt mit der Zeit des Erkaltens die Form des Werkstücks an und wird dann aus der Form genommen [Michaeli 2010].

Abbildung 25: Extrusionswerkzeug zum Blasformen



Quelle: Bonten 2014

Ein weiteres Extrusions-Verfahren ist die Co-Extrusion. Bei der Co-Extrusion ist durch die Kombination eines Hauptextruders mit einem zweiten Extruder die Möglichkeit gegeben, mehrere Schichten zusammenzufügen. Hierdurch können Produkte mit verschiedenen Farben oder Oberflächenbeschaffenheiten hergestellt werden [Elkamet 2017]. Bei der Produktion von PVC-Fenstern wird beispielsweise die Co-Extrusion eingesetzt. Hierbei sind die Innenkerne der Fensterprofile aus PVC-Rezyklat und die Oberflächen aus PVC-Neuware [Martens; Goldmann 2016].

2.3.2.2 Spritzgießen

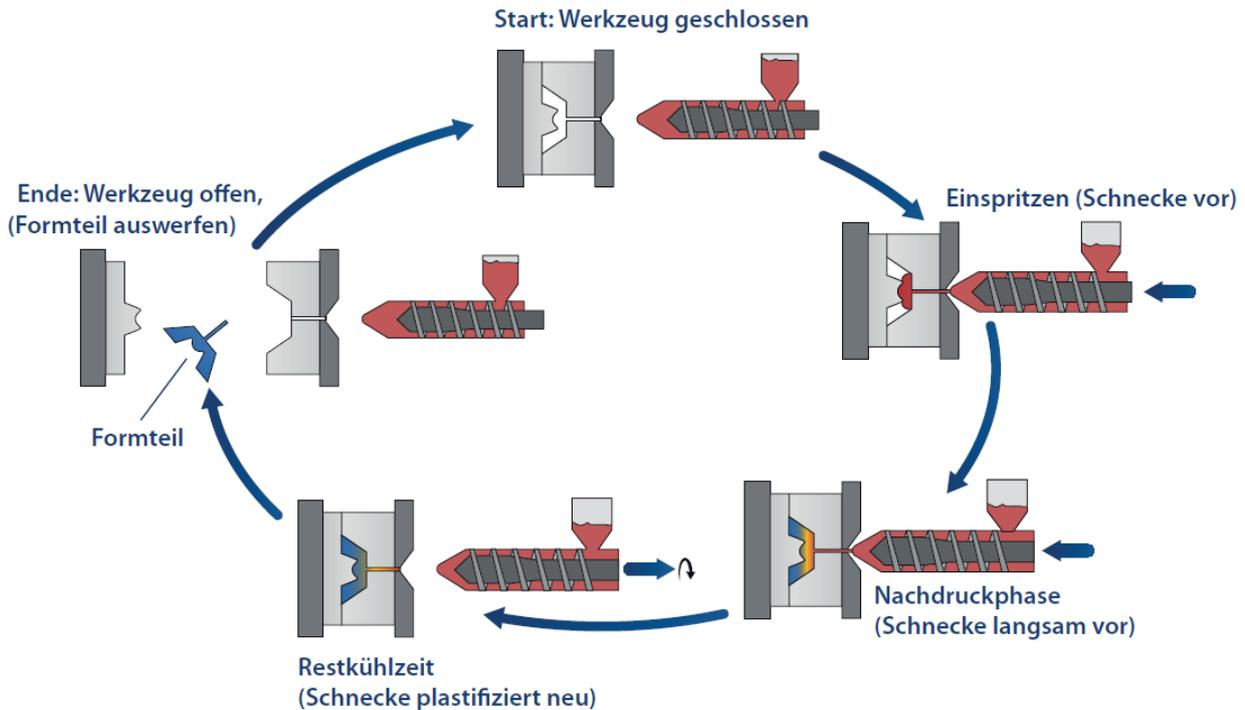
Durch das Verfahren des Spritzgießens können dreidimensionale, komplexe Produkte erzeugt werden. Den Verfahrensablauf gibt Abbildung 26 wieder. Der Spritzgießzyklus umfasst insgesamt fünf Phasen:

1. Werkzeug schließen
2. Einspritzen
3. Nachdruck- und Kühlphase
4. Dosieren
5. Werkzeug öffnen und Formteil auswerfen

Zunächst wird das Spritzgießwerkzeug geschlossen. Der Kunststoff gelangt über einen Trichter in den Extruder. Das Material wird nun bis zur vollständigen Plastifizierung aufgeschmolzen und homogenisiert. Die Schmelze wird anschließend durch eine Förderschnecke verdichtet und unter hohem Druck über eine Düse in das geschlossene, temperierte Werkstück gespritzt bzw. gepresst. Nach dem Einspritzen muss der Kunststoff zunächst abkühlen. In dieser Phase wird schon das nächste Material plastifiziert. Anschließend wird das hergestellte Kunststoffformteil durch das Öffnen des Werkzeugs aus-

geworfen. Als Endprodukte entstehen beim Spritzgießen beispielsweise Pflanztöpfe, Stoßfänger und Paletten [Bonten 2014].

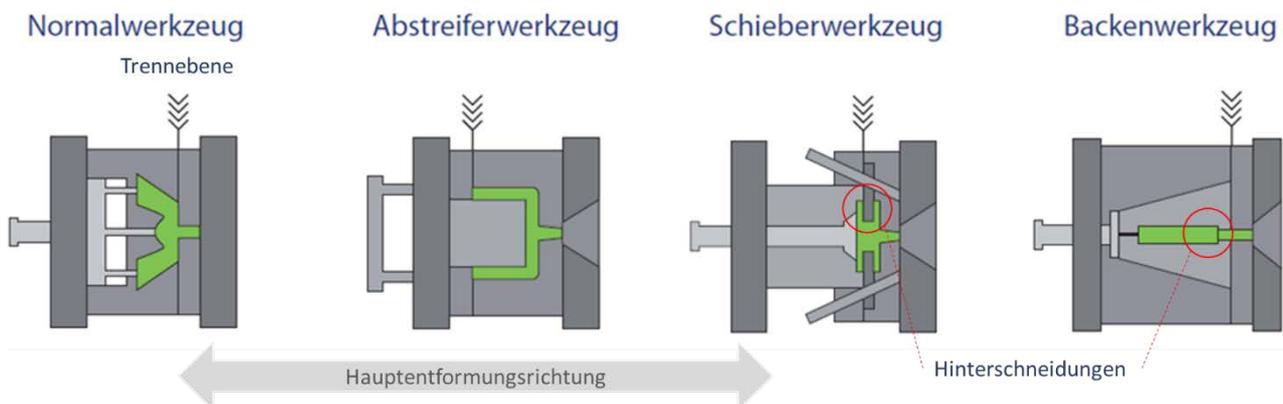
Abbildung 26: Ablauf des Spritzgießens



Quelle: Bonten 2014

Das Hauptaugenmerk liegt beim Spritzgießen auf dem Spritzgießwerkzeug, welches eine Negativform des zu produzierenden Formteils darstellt und verschiedene weitere Funktionen (Einleiten der Schmelze, Temperierung, Entformung) hat. In Abhängigkeit der Geometrie des Kunststoffteiles kommen unterschiedliche Werkzeuge zum Einsatz (vgl. Abbildung 27). Wichtig für die Auslegung des Werkzeuges sind die Rheologie (u.a. Fließverhalten der Schmelze), die mechanischen Werkstoffeigenschaften (z. B. zum Ausschluss von Deformation des Werkzeugs bzw. des Produkts) und die Temperatur [Bonten 2014].

Abbildung 27: Spritzgießwerkzeuge



Quelle: nach Bonten 2014

Die einfachste Bauform der Spritzgießwerkzeuge hat das Normalwerkzeug, mit welchem alle Formteile ohne Hinterschneidung produziert werden können [Menges et al. 2007]. Das Abstreiferwerkzeug ist vom Aufbau her dem Normalwerkzeug sehr ähnlich. Die Entformung erfolgt hierbei durch eine sogenannte Abstreiferplatte. Dieses Werkzeug ermöglicht die Herstellung becherförmiger Formteile. Schieber- und Backenwerkzeuge eignen sich dagegen für Spritzgussanwendungen mit Hinterschneidungen. Hinterschneidungen sind Vertiefungen bzw. Aussparungen, die ein Entformen des Spritzgießteils in Hauptentformungsrichtung erschweren bzw. unmöglich machen (Abbildung 27) [Dangel 2017]. Bei den Backen und Schiebern handelt es sich um bewegliche, formgebende Einsätze, die quer oder schräg zur Hauptentformungsrichtung eine Hilfstrennebene erzeugen und die Freigabe des Spritzgießteils ermöglichen [Menges et al. 2007, Dangel 2017]. Im Gegensatz zu den Schieberwerkzeugen umschließen die Backenwerkzeuge das Spritzgießteil komplett. Backen kommen bei der Herstellung von u.a. Flaschenkästen und Autobatterien, Schieber bei der Herstellung von u.a. Steckerleisten und Dübeln zum Einsatz [Dangel 2017].

3 Ermittlung und Beschreibung technischer Potenziale

Ziel des Vorhabens „Analyse des technischen Potenzials zur Steigerung des Kunststoffrecyclings und des Rezyklateinsatzes in Deutschland“ ist es, ausgehend von der Analyse des Stands der Technik (Kapitel 2) eine Abschätzung vorzunehmen, welche Potenziale hinsichtlich der Steigerung der Ausbeute, Qualität und Effizienz beim Kunststoffrecycling sowie hinsichtlich der Erhöhung der Rezyklatanteile durch technische und systemische Innovationen erreichbar sein könnten, die über den Stand der Technik hinausgehen. Neben der Beschreibung des Standes der Technik beim Kunststoffrecycling, wurden in Kapitel 2.3 auch der Stand des Rezyklateinsatzes beschrieben und Beispiele dargestellt, in denen bereits heute in erheblichen Mengen Kunststoffrezyklate eingesetzt werden. Dabei war es aus Wettbewerbsgründen nicht möglich zu ermitteln, welche spezifischen Rezyklatqualitäten für die konkreten Produktbeispiele erforderlich sind und auch nicht, welche technischen Lösungen eingesetzt werden, um die jeweilige Rezyklatqualität zu erreichen. Vor diesem Hintergrund ist eine technische Potenzialanalyse zur Steigerung des Rezyklateinsatzes bezogen auf die konkreten Beispiele nachfolgend nicht möglich. Daher wurde breiter und allgemeiner nach technischen Potenzialen zur Steigerung des Rezyklateinsatzes gesucht.

Der Schwerpunkt der Arbeiten zur Ermittlung der technischen Potenziale bestand in der Literaturrecherche und -auswertung, der Auswertung der Sitzungen des Projektbeirats, der Durchführung und Auswertung von Interviews mit Mitgliedern des Projektbeirats sowie einem internen Workshop zur Identifikation von möglichen technischen Potenzialen beim Kunststoffrecycling.

Im Rahmen des Projektes sollen Ansätze identifiziert und beschrieben werden, die verglichen mit dem Stand der Technik in Deutschland innovativ sind. Die umfangreiche Literatur zum Kunststoffrecycling hat jedoch nicht diesen regionalen Fokus. Eine Reihe von Innovationen und technischen Potenzialen, die in der Literatur beschrieben werden, können daher unter den Rahmenbedingungen der deutschen Abfallwirtschaft u.U. nicht erschlossen werden oder wurden u.U. bereits anders erschlossen. Umgekehrt besteht die Möglichkeit, dass in anderen Ländern erschlossene Potenziale und eingesetzte Techniken nicht identifiziert werden, da sie eben nicht als innovativ gekennzeichnet sind. Um dieses Problem zu umgehen, wurden die Rechercheergebnisse mit dem Stand der eingesetzten Techniken in Deutschland abgeglichen und mit dem Projektbeirat diskutiert, um mögliche in anderen Ländern umgesetzte Potenziale zu identifizieren.

Ein Großteil der verfügbaren Fachliteratur beschreibt Ergebnisse der universitären und außeruniversitären Forschung. Der Abstand dieser Forschungsergebnisse zur praktischen Anwendung ist bisweilen groß. Die Frage der Umsetzbarkeit dieser Forschungsergebnisse und ihrer Potenziale in die Praxis des Kunststoffrecyclings ist sowohl technisch als auch ökonomisch oft unklar. Insbesondere lassen sich weder Prozessparameter noch Ausbeuten oder Aufbereitungsqualitäten einfach vom Labormaßstab auf die Bedingungen in der Praxis übertragen.

Zugleich muss berücksichtigt werden, dass es vielfach auch einen erheblichen Abstand zwischen dem Stand der Technik und der industriellen Praxis gibt. Verfahren, die gegenüber der Praxis innovativ sind, stellen gegebenenfalls lediglich den Stand der Technik dar.

3.1 Wichtige Problemfelder beim Kunststoffrecycling

Kunststoffrecycling wird bereits seit Jahren erfolgreich praktiziert. Die wesentlichen Problemfelder beim Recycling sind daher bekannt.

Störstoffe: Ein wesentliches Problem beim Recycling von Kunststoffen sind unterschiedlichste Störstoffe. Hierzu gehören z. B. Papier, Metalle, Fremdkunststoffe, Verbunde, aber auch mit Additiven versetzte Kunststoffe zur Verbesserung der Materialeigenschaften (z. B. Barrieren in Verpackungen) oder

verschiedenste Verunreinigungen (z. B. Produktreste in Kunststoffverpackungen oder Erdanhaftungen bei Folien aus der Landwirtschaft). Eine Trennung der Werkstoffe in die einzelnen Werkstoffgruppen, aber auch eine Trennung der unterschiedlichen Kunststofffraktion ist bereits mit bestehender Technik möglich (vgl. Kapitel 3.1.1.). Vielfach entsprechen Anlagen jedoch nicht dem Stand der Technik oder eine Steigerung der Effizienz und Effektivität der Verfahren ist wünschenswert.

Farbsortierung: Die Farbe von Kunststoffen ist für eine Vielzahl von Anwendungen eine wichtige Eigenschaft. Da sich die Färbung nicht entfernen lässt und allenfalls eine Überfärbung, und damit dunklere Farben, möglich sind, kommt der Farbsortierung eine große Bedeutung zu. Beim PET-Recycling hat sich dabei inzwischen eine Flakesortierung etabliert. Bei anderen Kunststoffen erfolgt i.d.R. noch keine Farbsortierung, obwohl die Technik grundsätzlich verfügbar ist.

Geruch: Der Geruch von Kunststoffrezyklaten ist vielfach ein entscheidendes Kriterium gegen einen Einsatz, insbesondere bei Verpackungen, im Automobilbereich aber auch bei anderen Produkten, die in Innenräumen eingesetzt werden sollen. Eine Verringerung von Gerüchen ist daher eine wesentliche Voraussetzung für eine Steigerung des Rezyklateinsatzes in diesen Bereichen. Zur Verringerung der Gerüche können verschiedene wirksame Waschverfahren eingesetzt werden. Problematisch ist aber insbesondere auch der Aufwand für diese Verfahren und die damit verbundenen Kosten.

Kontaminationen: Kontaminationen können den Einsatz von Rezyklaten be- oder verhindern. Das trifft insbesondere auf den Einsatz in Lebensmittelverpackungen zu, aber auch für den Einsatz von Altkunststoffen aus Elektrogeräten und Bauprodukten, die häufig nicht mehr zugelassene Flamm- schutzmittel enthalten. Derartige Kontamination aus Kunststofffraktionen zu entfernen (etwa durch Lösemittelverfahren), kann daher mit einem erheblichen Potenzial zur Verbesserung des Einsatzes von Sekundärkunststoffen verbunden sein. Auch hier ist der Aufwand jedoch teilweise unwirtschaftlich hoch. Einfacher ist es häufig, kontaminierte Kunststofffraktionen auszuschleusen. Dies läuft jedoch dem Ziel eines erhöhten Recyclings entgegen.

Als besonders kritische Größen werden insbesondere die Farbe und der Geruch von Rezyklaten genannt. Hier besteht ein erheblicher Optimierungsbedarf.

Daneben besteht aber offensichtlich vor allem auch ein Bedarf daran, die bisher eingesetzten Verfahren effizienter zu machen und den Verbrauch von Energie, Wasser und Betriebsmitteln zu reduzieren, aber auch die Investitionskosten zu verringern.

Die Recherche und Darstellung von technischen Potenzialen zur Erhöhung des Kunststoffrecyclings orientierte sich einerseits an den zuvor genannten Problemfeldern, andererseits analog zur Gliederung im Kapitel 2 an den grundsätzlichen Schritten Sortierung, Verwertung und Rezyklateinsatz.

3.2 Einsatz von Rezyklaten - Beispiele aus der Praxis

Im Kapitel 2.3.1 wurden insgesamt 29 Beispiele ausgewählt (siehe Tabelle 17), bei denen Recycling bereits heute funktioniert und die möglicherweise geeignet sind, Hemmnisse und Potenziale für einen weiteren Rezyklateinsatz in anderen Bereichen zu identifizieren und den Rezyklateinsatz insgesamt zu erhöhen. Die Beispiele stammen aus den Bereichen Bauwirtschaft (8), Verpackungen (4), Haushaltsbereich (4), Büroartikel (3), Textil (2), Elektrogeräte (3) und Fahrzeug (5) (vgl. Tabelle 17).

Zur Beschreibung der Beispiele und zur Identifikation von Potenzialen muss dabei auf die öffentlich verfügbaren Informationen zu den Produkten und den allgemeinen Verfahrensbeschreibungen aus Kapitel 2 zurückgegriffen werden. Die öffentlich verfügbaren Informationen (häufig in Form von Pressemitteilungen, Informationen auf Unternehmenshomepages oder veröffentlichte Präsentationen) zu den einzelnen Produktbeispielen sind leider häufig wenig konkret und teilweise ausgesprochen unvollständig (vgl. Tabelle 17), sie dienen häufig eher der Öffentlichkeitsarbeit als der Information einer

Fachöffentlichkeit. Dies betrifft an vielen Stellen sowohl die genauen eingesetzten Sekundärrohstoffe bzw. Sekundärrohstoffqualitäten, die eingesetzte Verfahrenstechnik, die genauen Anforderungen an die Produkte und Werkstoffe, aber auch die Anteile an Sekundärrohstoffen, die in den Produkten eingesetzt werden. Auf der Grundlage von wenigen allgemeinen Informationen zu den Produktbeispielen lassen sich aber keine konkreten technischen Potenziale ableiten. Hierfür fehlt die Zugänglichkeit zu der benötigten Datengrundlage. Eine Schließung dieser Informationslücken war im Projektrahmen nicht möglich (vgl. auch 2.3.1). Daher kann hier nur versucht werden, von den Beispielen die allgemeinen Prinzipien abzuleiten, die den Einsatz von Rezyklaten ermöglichen. Einzelproduktbezogene quantitative Beschreibungen von Optimierungspotenzialen für die Produktbeispiele, oder ebensolche Übertragungen auf andere Produkte, sind auf dieser Basis jedoch nicht möglich.

Betrachtet man die vorrangigen Problemfelder, Farbe und Geruch, so zeigt sich, dass bezüglich dieser Probleme bei den Beispielen verschiedene Strategien gewählt wurden, um diese Problemfelder zu umgehen.

- **Bauwirtschaft:** Ein wesentlicher Aspekt, der bei einigen Bauprodukten den Rezyklateinsatz erleichtert, ist, dass sowohl Farbe als auch Geruch für im Außenbereich oder unter Putz eingesetzte Bauprodukte von geringer Relevanz sind und daher die Anforderungen hieran geringer sind. Hinzu kommt, dass hinsichtlich der mechanischen Festigkeit besonders kritische Anwendungen, insb. druckbeaufschlagte Rohre, von einer Verwendung von Rezyklaten ausgeschlossen sind. Daher kommt es im Baubereich letztlich zu einer Kaskadennutzung¹³, d. h. einem Einsatz der Rezyklate in einem Bereich, in dem hinsichtlich einzelner Materialeigenschaften geringere Anforderungen gestellt werden können als bei der ursprünglichen Anwendung der Werkstoffe.

Die Kunststoffrezyklate stammen aus Gewerbeabfällen oder aus LVP/WST-Gemischen. Insbesondere getrennt gesammelte und sortenreine Gewerbeabfallfraktionen haben den Vorteil, dass sie gegenüber LVP/WST-Gemischen deutlich weniger verunreinigt sind. Im Fall der PVC-Fensterprofile werden diese recycelt und die Rezyklate im Inneren neuer Fensterprofile eingesetzt. Auch wenn der Einsatz hier im Ursprungsprodukt erfolgt, geschieht dies doch in einem hinsichtlich einiger Anforderungen (Farbe, ggf. auch Oberflächenqualität) weniger anspruchsvollen Bereich.

- **Verpackungen:** Bei den Beispielen aus dem Bereich der Verpackungen kommen neben Kunststoffrezyklaten aus der LVP/WST-Sammlung insbesondere Sekundärkunststoffe aus einem Pfandsystem zum Einsatz, die mit sehr guter Sortenreinheit gesammelt werden. Hinzu kommt eine aufwendige Aufbereitung, die neben einer Wäsche auch eine Farbsortierung beinhaltet. Es wird also ein hoher Sortier- und Aufbereitungsaufwand betrieben, der entsprechend hochwertige Rezyklate erzeugt. Hinzu kommt, dass im Fall von PET einer eingetretenen Kettenverkürzung durch eine Feststoffkondensation mit Kettenverlängerung entgegengewirkt werden kann. Vergleichbare Möglichkeiten bestehen bei anderen Massenkunststoffen nicht.

In einem Fall (Umreifungsbänder) spielen außerdem Farbe und Geruch nur eine untergeordnete Rolle.

¹³ Aus werkstofftechnischer Sicht ist für eine Kaskadennutzung typisch, dass der Weg der Werkstoffe nur in eine Richtung möglich ist, da nicht alle Eigenschaften für die ursprüngliche Anwendung erreicht werden können. Die ökonomische Bewertung des jeweiligen Werkstoffeinsatzes kann davon abweichen.

- **Haushaltsbereich:** Ähnlich wie im Baubereich gibt es hier einige Produkte, bei denen sowohl Farbe als auch Geruch von geringer Relevanz sind, da sie im Außenbereich eingesetzt werden. Auch hier herrscht daher eine Kaskadennutzung vor. Teilweise kommen dabei auch besonders gut zu identifizierende und entsprechend sortenrein zu erfassende Altprodukte zum Einsatz.
- **Büroartikel:** Bei den als Beispielen aufgeführten Büroartikeln werden, soweit bekannt, post-consumer Materialien aus Elektroaltgeräten eingesetzt. Elektroaltgeräte werden separat gesammelt (vgl. Kapitel 2.1.4), die eingesetzten Materialien weisen geringe Verunreinigungen auf und sind gut identifizierbar. Aus ihnen lassen sich daher nach Aufbereitung sortenreine Sekundärkunststoffe herstellen.
- **Textil:** Bei den Beispielen aus dem Textilbereich kommen insbesondere die in guter Qualität anfallenden Materialien aus einem Pfandsystem zum Einsatz. Hier gelten dieselben begünstigenden Faktoren wie bei den Beispielen aus dem Verpackungsbereich, wobei hier die eintretenden Kettenverkürzungen von PET nicht nachteilig, sondern für die Zielprodukte sogar vorteilhaft sind.
- **Elektrogeräte:** Im Bereich der Elektrogeräte kann aufgrund der Rücknahmepflicht durch den Handel und der auch darüber hinaus gehenden getrennten Rücknahme, etwa durch kommunale Recyclinghöfe [vgl. ElektroG], auf gut vorsortierte Geräte mit geringer Verschmutzung zurückgegriffen werden. Insbesondere nach einer Demontage liegen große, saubere und gut zu identifizierende Altkunststoffe vor, die relativ einfach hochwertig recycelt werden können. Problematisch können jedoch abhängig von den Produkten die dort eingesetzten Flammenschutzmittel sein.
- **Fahrzeuge:** Bei den im Bereich der Fahrzeuge aufgeführten Beispiele wird post-consumer Material aus gut und eindeutig zu identifizierenden großen Bauteilen, insbesondere Stoßfänger, für die Herstellung von Radlaufverkleidungen und Unterbodenverkleidungen genutzt. Hierbei handelt es sich um Anwendungen mit gegenüber der ursprünglichen Anwendung geringeren Anforderungen, insbesondere handelt es sich nicht um sicherheitskritische Bauteile. Angaben zum Einsatz von Rezyklaten aus recycelten Stoßfängern konnten trotz Nachfragen nicht verifiziert werden.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die ausgewählten Beispiele vor allem deshalb funktionieren, da typische Probleme beim Einsatz von Kunststoffrezyklaten umgangen werden.

In zahlreichen Fällen, erfolgt eine Kaskadennutzung, d. h. eine Nutzung, bei der nicht in allen Bereichen die ursprüngliche Produktqualität erreicht werden muss, sondern geringere oder andere (geringe Kettenlänge) Anforderungen gestellt werden, die mit den eingesetzten Rezyklaten erreicht werden können. Es kommt hierbei letztlich das Prinzip der anwendungsgerechten Werkstoffauswahl zur Anwendung.

Eine andere wichtige Strategie besteht auch darin, nur ausgewählte Inputs zu verwenden, insbesondere Getränkeflaschen aus dem Pfandsystem und industrielle Abfälle, nicht jedoch End-of-life Abfälle aus dem dualen System. Diese Altkunststoffe liegen bereits gut sortiert vor, weisen geringere Verunreinigungen auf und können einfacher hochwertig recycelt werden.

Ergänzt wird dies insbesondere im Verpackungsbereich um eine z.T. intensive Aufbereitung der Altkunststoffe, die ein hochwertiges Recycling erlaubt, jedoch auch mit einem entsprechend höheren Aufwand verbunden ist.

Insofern lassen sich aus den Beispielen insbesondere auf der organisatorischen Ebene Vorgehensweisen ableiten, die das Kunststoffrecycling begünstigen. Erkennbar ist, dass Faktoren wie

- Verringerung der Werkstoffvielfalt

- Rücknahme und Pfandsysteme für einzelne Werkstoffe/Produkttypen
- Nutzung von Werkstoffen, die nicht degradieren oder wieder regeneriert werden können,

begünstigend wirken.

Die im Mittelpunkt dieses Projektes stehenden möglichen technischen Potenziale zur Verbesserung des Recyclings sind jedoch kaum ableitbar.

Bei der Suche nach technischen Innovationen, die ein Recycling von Kunststoffen verbessern können, erfolgt die Analyse daher im folgenden Kapitel 3.3 nicht mit einem Fokus auf die Beispiele aus Kapitel 2.3.1, sondern allgemein für die verschiedenen Schritte beim Kunststoffrecycling.

3.3 Mögliche technische Innovationen

3.3.1 Sortierung

Ziel der Sortierung ist, vermarktungsfähige Produkte herzustellen (vgl. Kapitel 2.1). Aufgabe einer Sortierung ist es daher, die in einem Abfallstrom enthaltenen Kunststoffe hinsichtlich der Kunststoffsorte, bei guter Ausbeute und Selektivität mit möglichst hoher Reinheit und mit möglichst geringem Aufwand zu sortieren und einer nachfolgenden Aufbereitung zuzuführen. Zwischen diesen verschiedenen Aufgaben bestehen verschiedenste Zielkonflikte, insbesondere steht der ökonomische und ökologische Aufwand der Sortierung in einem steten Konflikt um eine möglichst „gute“ Sortierung.

Die Sortierung versucht daher insbesondere die einfachen und möglichst nutzbringenden Sortiermöglichkeiten zu nutzen, um die Sortierziele zu erreichen. Wesentliche Herausforderungen bei der Sortierung ist die Trennung der einzelnen Kunststoffsorten. Eine Sortierung von Verbundmaterialien ist schwierig, da bei Detektoren i.d.R. die oberste Schicht identifiziert wird und daher eine falsche Zuordnung erfolgen kann. Bei Dichtentrennungen können die Verbunde ebenfalls nicht eindeutig von den anderen Kunststoffen abgetrennt werden, da die Dichte zwischen den verschiedenen eingesetzten Kunststoffen liegt. Ähnliche Probleme können gefüllte Kunststoffe bereiten. Bei der Sortierung von schwarzen Kunststoffen besteht das Problem, dass herkömmliche NIR-Detektoren die rußgefärbten Kunststoffe nicht erkennen können.

Eine große Herausforderung bei der Herstellung von Recyclingkunststoffen aus Kunststoffabfällen besteht darin, dass die unterschiedlichsten Kunststoffsorten nicht miteinander kompatibel sind. Beispielsweise wird eine geringe Menge an PVC-Verunreinigungen in einem PET-Recyclingstrom zur Entwicklung von Salzsäuregas führen und damit zur Verkürzung von PET-Molekülketten [Hopewell et al. 2009]. Die möglichst sortenreine Trennung von Kunststoffen ist daher eine der wesentlichen Voraussetzungen für die hochwertige Nutzung von gemischten Kunststoffabfällen. Dementsprechend ist die Sortierung der wichtigste Schritt bei der Aufbereitung von Kunststoffabfällen. Hierbei muss auch berücksichtigt werden, dass es neben den sieben Kunststoffsorten, für die es Recycling-Codes gibt, noch zahlreiche weitere Kunststoffsorten gibt. Die Vielfalt an Kunststoffsorten und -typen erhöht sich zusätzlich aufgrund von diversen Zusatzstoffen (Additiven). Hinzu kommt die Kombination verschiedener Kunststoffe zu Verbundmaterialien. Diese Bandbreite an Kunststoffen bringt unterschiedliche Eigenschaften mit sich, wie z. B. unterschiedliche Schmelzpunkte und andere abweichende Eigenschaften – auch innerhalb desselben Recycling-Codes [Eureka]. Es reicht daher für viele Kunststoffe nicht, sie nach den Recycling Codes zu sortieren.

Die zahlreichen spezifischen Kunststoffsorten erhöhen nicht nur die Anzahl der zu trennenden Stoffe, sie erschweren auch erheblich die Identifikation und Sortierung von Kunststoffabfällen. Kunststoffe können etwa aufgrund ihrer Dichteunterschiede oder triboelektrischen (reibungselektrischen) Eigenschaften sortiert werden. Theoretisch könnten durch elektrostatische Separation alle mengenmäßig relevanten Kunststoffe voneinander getrennt werden. Limitierend wirken sich hierbei jedoch Additive

und Verunreinigungen aus, da sie die Eigenschaften der Kunststoffe überlagern können. Insbesondere nur gering unterschiedliche Kunststoffe lassen nicht oder nur schwer trennen, was problematisch ist, wenn eine Vielzahl von Kunststoffen im zu sortierenden Abfallstrom enthalten ist [Shent et al. 1999].

Für die Sortierung von Kunststoffabfällen wurden daher zahlreiche Verfahren entwickelt. Hierzu sind zwei wesentliche Schritte notwendig, die eigentliche Identifikation der Stoffe und die Trennung der Kunststoffe in die unterschiedlichen Fraktionen. Die Identifikation und Sortierung von Kunststoffabfällen muss in der Recyclingindustrie dabei zwei wesentliche Kriterien erfüllen, sie muss schnell mit einem großen Durchsatz erfolgen und kosteneffizient sein [Al Salem et al. 2009]. Generell kann eine Reihe von Kunststoffen eindeutig identifiziert und aus dem Strom ausgeschieden werden (siehe auch Kapitel 2.1). Die Sortierleistung kann durch den Einsatz mehrerer Detektoren und die Sortierung in Serie maximiert werden [Hopewell et al. 2009].

Eine Folge der Schwierigkeiten der Identifikation von Kunststoffen ist, dass sich hochwertiges Recycling von Post-Consumer Kunststoffabfällen auf wenige Kunststoffe beschränkt, und insbesondere auf die am leichtesten zu trennenden Verpackungen konzentriert, die eindeutig identifiziert und auch aus einem gemischten Abfallstrom aussortiert werden können und zudem eine sehr einheitliche Zusammensetzung aufweisen. Hingegen wird das Recycling von Mehrschicht- oder Mehrkomponentenartikeln deutlich weniger praktiziert, da diese zu Verunreinigungen zwischen den Kunststoffsorten führen können [Hopewell et al. 2009].

Aufgrund der beschriebenen Schwierigkeiten besteht in der Verbesserung der Sortierung noch ein erhebliches technisches Potenzial zur Steigerung des Kunststoffrecyclings.

3.3.1.1 Einsatz weiterer Detektoren

Insbesondere die Trennung rußgefärbter schwarzer Kunststoffe ist mit Schwierigkeiten verbunden, da die üblichen NIR-Detektoren nicht in der Lage sind, schwarze Kunststoffe zu identifizieren. Daher gibt es, neben den bereits heute erhältlichen Verfahren zur Identifikation von schwarzen Kunststoffen (vgl. Kapitel 2.1.1), eine Reihe weiterer Ansätze, die Sortierung von schwarzen Kunststoffen zu verbessern.

Ein größeres Vorhaben zur Trennung schwarzer Kunststoffe wird von verschiedenen Instituten der Fraunhofer Gesellschaft durchgeführt [Bendel 2015]. Ziel ist es hierbei, ein serienreifes und wirtschaftliches Sortiersystem aufzubauen, das sich auch für schwarze Kunststoffe eignet und eine hohe Sortenreinheit von 98-99% liefert. Hierbei wird mit einzelnen Frequenzen aus einem Frequenzbereich von 0,1 bis 1 Terahertz auf andere Frequenzen als bei den bisherigen Detektoren zurückgegriffen, die auch bei optisch intransparenten, d.h. schwarzen, Kunststoffen, eine eindeutige Identifizierung der Kunststoffe zulassen sollen. Die Markteinführung war für Ende 2017 angekündigt [Fraunhofer FHR et al. 2016; Kunststoffe.de 2016]. Berichte über den Einsatz der neuen Sortiertechnologie liegen bisher nicht vor.

Grundsätzlich können unterschiedlichste elektromagnetische Strahlungen und die Reaktion der bestrahlten Materialien zur Identifikation von Kunststoffen genutzt werden. Auch die Identifikation von Kunststoffen über ihre jeweilige charakteristische Fluoreszenz wird in der Literatur beschrieben [Langhals et al. 2015] und ist grundsätzlich möglich. Dabei soll auch eine Unterscheidung von LDPE, HDPE und UHDPE möglich sein, die ansonsten nur schwer gelingt. Daneben sollen sich auch verschiedene Herstellungsverfahren wie PET für Flaschen und PET-Platten oder verschiedene Arten von Silikon gut kategorisieren lassen. Die Nutzung der Fluoreszenz von Kunststoffen kann ein zusätzliches Verfahren zur besseren Identifikation von Kunststoffen sein.

Auch die Möglichkeit zum Einsatz von RAMAN-Spektroskopie¹⁴ zur Identifikation von Kunststoffsorten unabhängig von ihrer Farbe wird diskutiert. Sie soll in der Lage sein, Kunststoffe schnell und mit hoher Genauigkeit zu identifizieren. Es ist jedoch davon auszugehen, dass diese Technologie mit sehr hohen Kosten verbunden sein wird [Sheu 2017].

Eine wesentliche Herausforderung ist, nicht nur die schwarzen Kunststoffe nach Kunststoffsorten zu identifizieren, sondern ein solches Verfahren auch wirtschaftlich zu gestalten. Neben den erheblichen Investitionskosten bestehen grundsätzlich Schwierigkeiten bei der Integration zusätzlicher Detektoren mit ihrem zusätzlichen Platzbedarf in bestehende Anlagen.

Bei der Identifikation und Trennung von Kunststoffen besteht zum Teil eine erhebliche Diskrepanz zwischen dem Stand der Technik und der Praxis.

3.3.1.2 Marker

Für ein hochwertiges Recycling werden möglichst Monofractionen der Kunststoffe benötigt. Eine Möglichkeit zur vereinfachten sortenreinen Trennung von Kunststoffen ist die Nutzung von fluoreszierenden Markern. Zur Kennzeichnung können hierbei unterschiedliche Marker auf der Basis von Selten-Erd-Metallen eingesetzt werden. Die Kennzeichnung kann dabei durch den Einsatz von Markern in die Kunststoffmatrix erfolgen, jedoch auch durch Aufdrucke oder Etiketten. Durch den Einsatz unterschiedlicher Marker soll es dabei möglich sein, eine größere Zahl von Kunststoffen eindeutig zu identifizieren. Bei Erprobung dieser Technik konnte gezeigt werden, dass eine hohe Erkennung von 99,4% erreicht werden kann. Hierbei können auch die Sortierprobleme dunkler Kunststoffe adressiert werden und gegebenenfalls auch die Grenzen der derzeit eingesetzten Verfahren z. B. NIR-Sensoren überwunden werden [Brunner et al. 2015]. Eine Identifikation der markierten Kunststoffe wird mit Fluoreszenzspektroskopie und damit mit grundsätzlich verfügbarer Technik möglich sein.

Die benötigten Mengen an Markern bewegen sich im Bereich von 1-100 mg/kg Kunststoff, der lebenszyklusweite zusätzliche stoffliche wie energetische Aufwand ist daher, abhängig von der konkreten Art der Anwendung, gering. Sehr geringe Einsatzmengen lassen sich insbesondere beim Einsatz von Markern durch Aufdrucke oder Etiketten realisieren. Hierbei ist auch ein Recycling der Marker am einfachsten möglich. Zugleich schränkt man dabei den Einsatzbereich ein, denn in diesem Fall eignet sich das Verfahren nur für die Identifikation von ganzen Objekten, jedoch nicht für eine Flakesortierung. [Woidasky et al. 2017; Woidasky et al. 2018].

Problematisch ist auch, dass Marker zu einer dauerhaften Kontamination mit diesen Markern führen können, wenn diese in die Kunststoffmatrix eingebracht werden, weshalb sie sich vor allem als Indikator für auszusortierende Stoffe eignen oder geschlossene Kreisläufe voraussetzen.

Insbesondere bei der Kennzeichnung und Identifikation von schwarzen Kunststoffen steht der mögliche Einsatz von Markern in Konkurrenz zu anderen Verfahren, insbesondere dem Einsatz erweiterter Infrarottechnik (vgl. Kapitel 3.3.1.1) oder digitalen Wasserzeichen.

Digitale Wasserzeichen sind eine weitere Möglichkeit zur Kennzeichnung von Kunststoffprodukten. Sie arbeiten mit Oberflächenstrukturen und kommen daher ohne Marker aus. Kontaminationsprobleme bestehen dabei nicht. In einem laufenden Projekt wird, neben Markern, auch der Einsatz digitaler

¹⁴ Bei RAMAN-Spektroskopie erfolgt eine Bestrahlung mit einer Erregerstrahlung hoher Intensität (UV-Licht bis sichtbares Licht). Das Licht wird jedoch vom Material nicht absorbiert, sondern gestreut. Hierbei können im Spektrum für die Materialien charakteristische Banden oder Linien beobachtet werden. [vgl. z. B. Näser /Peschl 1990]

Wasserzeichen getestet. Die Ergebnisse der Versuche werden für Ende 2019 erwartet [Pioneer project HolyGrail].

3.3.1.3 Sortierung nach Form oder nach Material

Grundsätzlich besteht die Möglichkeit, Kunststoffabfälle nach den Kunststoffsorten oder der Form zu sortieren. Bei einer Sortierung nach der Form unter Zuhilfenahme optischer Systeme zur Formerkennung können z. B. bestimmte Kunststoffprodukte aussortiert werden, die typischerweise aus bestimmten Kunststoffen bestehen (z. B. Flaschen von Reinigungsmitteln oder Kabel). Solche Verfahren kommen bereits bei der Aufbereitung von Elektroschrott zum Einsatz [Drekopf 2019]. Insbesondere in Kombination mit einer nachgeschalteten Sortierung der Kunststoffabfälle nach ihrer Sorte könnte eine sehr hohe Sortierqualität erreicht werden. Eine Sortierung nach Form und Material kann jedoch nicht einfach in bestehenden Anlagen realisiert werden, sondern erfordert erhebliche Umbauten.

3.3.1.4 Zusammenfassung, Potenziale bei der Sortierung

In Hinblick auf die Notwendigkeit zur besseren Identifikation und Sortierung der Kunststoffabfälle bestehen technische Potenziale durch den

- Einsatz mehrerer und anderer Detektoren
- Den Einsatz von Markern zur Kennzeichnung von Kunststoffen
- Kombinierte Sortierung nach Form und Kunststoff

3.3.2 Aufbereitung

Die weitere Aufbereitung der sortierten Kunststofffraktionen dient der gezielten Herstellung von Rezyklaten. Sie kann durch den Einsatz von Verfahren, die der Entfernung unterschiedlicher Verunreinigungen und Störstoffe, aber auch der weiteren Sortierung dienen, die Qualität der gewonnenen Rezyklate maßgeblich beeinflussen (vgl. 2.2.1). Neben einer Verbesserung der Aufbereitungsqualität können hierbei insbesondere auch Verringerungen des Energie-, Wasser- und Betriebsstoffeinsatzes Gegenstand technischer Optimierung sein. Dies betrifft prinzipiell alle Bereiche von der Zerkleinerung, dem Transport aber auch der Wäsche und Trocknung der Altkunststoffe. Typische Verbrauchswerte für eine trocken/nassmechanische Aufbereitung finden sich in Tabelle 8.

3.3.2.1 Wäsche

Bezüglich der spezifischen Materialeigenschaften, aber auch hinsichtlich Geruch und Farbe bestehen gleiche Anforderungen an Primär- und Sekundärmaterialien. Die Erfüllung der Anforderungen ist z. T. für Sekundärkunststoffe nur schwer möglich und führt häufig zu einem Ausschluss von Sekundärmaterialien bei der Herstellung von Neuprodukten. Kunststoffabfälle enthalten typische Verunreinigungen (z. B. Produktreste oder Etiketten). Diese Verunreinigungen können vielfältige Probleme bei der Verarbeitung zu Recyclingkunststoffen, aber auch im Endprodukt hervorrufen, und müssen daher im Aufbereitungsprozess entfernt werden. Viele der Verunreinigungen können durch Waschen entfernt oder verringert werden [Azeem et al. 2017]. Neue Waschanlagen benötigen nur etwa die Hälfte älterer Anlagen. Hierbei bestehen jedoch große Unterschiede auch hinsichtlich der aufzubereitenden Materialien und Verschmutzungsgrade. Erhebliche Unterschiede gibt es auch hinsichtlich des Energieverbrauchs der Wäsche. Energieaufwendig ist insbesondere eine Heißwäsche, aber auch der zusätzliche Einsatz einer Friktionsreinigung (vgl. Kapitel 2.2.4.2 und 4.2.2).

Eine verbesserte Wäsche, abhängig von den Ausgangsmaterialien und Anforderungen z. B. Heißwäsche, d. h. bei einer Wäsche, bei der das Waschwasser gezielt erhitzt wird, um die Reinigungsleistung zu erhöhen, der Einsatz mehrerer Becken, aber auch der Einsatz von Tensiden kann die Reinigungsleistung und damit die Qualität der Rezyklate verbessern und ihr Einsatzspektrum verbreitern. Sowohl der Einsatz einer Heißwäsche, mehrerer hintereinander geschalteter Becken als auch der Einsatz von Tensiden ist jedoch bisher nicht oder nur in wenigen Fällen (z. B. Heißwäsche beim PET-Recycling) etabliert (vgl. 2.2.1).

Eine Verbesserung der Reinigung von Kunststoffabfällen kann das Potenzial für Kunststoffrecycling deutlich erhöhen. Zugleich ist die Reinigung von Kunststoffabfällen mit Kosten, aber auch mit einem Aufwand von Energie, Wasser und Hilfsstoffen verbunden. Es wird daher in der Regel darum gehen müssen, die geeignete Balance zwischen Qualitätsgewinn und Aufwand zu finden sowie die Verfahren etwa in Hinblick auf den Energie- und Wasserverbrauch oder eine mögliche Kreislaufführung von Waschwasser zu optimieren.

3.3.2.2 Separation

Nach der Zerkleinerung können verschiedene Trenntechniken angewendet werden. Durch die Schwimm-/Sinktrennung können Kunststoffsorten in Abhängigkeit von ihrer Dichte getrennt werden (vgl. Kapitel 2.2.1). Als Trennmedium dient Wasser. Hiermit können Polyolefine (PP, HDPE, L/LLDPE) effektiv von PVC, PET und PS getrennt werden. Je nach Dichteverteilung der zu trennenden Kunststoffe wird das Trennmedium mit entsprechenden Zusätzen versetzt, um so dessen Dichte entsprechend einzustellen (z. B. durch den Einsatz von Salzen zur Erhöhung der Trenndichte). Auf diese Weise wird z. B. auch eine Trennung von PS und PET ermöglicht. Bei sich überschneidenden Dichtebereichen verschiedener Kunststoffe, wie z. B. bei PVC und PET ist die Schwimm-/Sinktrennung nicht geeignet, da es hier leicht zu Kreuzkontaminationen kommen kann [University of Cambridge 2005; Hopewell 2009]. Problematisch ist auch, wenn durch die Verwendung von Füllstoffen (wie z. B. Talkum) die Dichte von Kunststoffen erhöht und somit die Trennung anhand von Dichtemerkmale negativ beeinflusst wird [Shent et al. 1999].

Für die Flakesortierung, bisher nur bei der PET-Sortierung etabliert, gibt es verschiedene Methoden. Herkömmliche PET-Sortiersysteme beschränken sich überwiegend auf die Trennung farbiger Flakes von klaren PET-Flakes und die Abtrennung von Materialien mit abweichender Dichte aus PET. Neue Ansätze wie Laser-Sortiersysteme können genutzt werden, um andere Verunreinigungen wie Silikone und Nylon auch aus anderen Altkunststoffen zu entfernen. Technologien zur Reduzierung der PVC-Kontamination in PET-Flakes sind die Fourier-Transformation Nah-Infrarot (FT-NIR)¹⁵ oder Raman-Emissionsspektroskopie-Detektoren. Diese Ansätze können genutzt werden, um gemahlene Kunststoffabfälle zu trennen. Diese Verfahren werden bisher jedoch nur in wenigen europäischen Recyclinganlagen eingesetzt und sind teilweise mit hohen Investitionen verbunden [Hopewell et al. 2009]. Ein Einsatz dieses Verfahrens erscheint jedoch auch nur dort sinnvoll, wo PET-Altkunststoffe mit PVC-Verunreinigungen anfallen. Dies kann der Fall sein, wenn in dem jeweiligen Markt neben Getränkeflaschen aus PET auch solche aus PVC vorkommen, was für den deutschen Markt nicht zutrifft.

¹⁵ Bei der FT-NIR Spektroskopie werden Detektoren eingesetzt die gegenüber herkömmlichen Detektoren schneller arbeiten und eine höhere spektrale Auflösung zeigen.

Die Grenzen der Schwimm-/Sinktrennung können teilweise durch Flotation¹⁶, insb. Schaumflotation¹⁷ überwunden werden. Flotation kann hierbei flexibler eingesetzt werden als andere Trennverfahren, da die Möglichkeit zur Trennung nicht alleine durch die Dichte bestimmt wird, sondern durch die eingesetzten Flotationschemikalien beeinflusst werden kann und auch eine Trennung von Stoffen ähnlicher Dichte möglich ist. Die Umsetzung von Verfahren zur Flotation von Kunststoffen in die industrielle Anwendung gestaltet sich jedoch nicht einfach [Shent et al. 1999]. Durch Flotation werden bereits seit langer Zeit Erze aufbereitet. Die Flotation von Kunststoffabfällen unterscheidet sich jedoch von der Erzflotation. Mehrere Faktoren erschweren die Flotation von Kunststoffen: Kunststoffabfälle sind häufig in Größe und Zusammensetzung heterogen; Kunststoffabfälle enthalten daneben häufig variierende Verschmutzungen und Füllstoffe, die z. B. einen Einfluss auf die Dichte der Kunststoffe haben [Wang et al. 2015a].

Bei Versuchen wurde die Abtrennung von PET aus Kunststoffabfällen durch Schaumflotation in Kombination mit einer alkalischen Vorbehandlung untersucht. Hierbei konnte unter optimalen Bedingungen PET von Acrylnitril-Butadien-Styrol (ABS), Polystyrol (PS), Polycarbonat (PC) oder Polyvinylchlorid (PVC) mit hoher Reinheit und Effizienz abgetrennt werden. Die Reinheit von PET lag bei bis zu 98,46% und die Rückgewinnung bei über 92,47% und erreichte damit im Versuch hohe Werte [Wang et al. 2015b].

Die Oberflächenmodifikation mit Kaliumpermanganat (KMnO_4)-Lösung wurde für die Trennung von PVC und PET-Abfallkunststoffen entwickelt. Die Schwimmfähigkeit von PVC nimmt mit zunehmender KMnO_4 -Konzentration, Behandlungszeit, Temperatur und Rührgeschwindigkeit ab, während die von PET nicht beeinträchtigt wird. PVC und PET mit unterschiedlichen Korngrößen wurden durch eine zweistufige Flotation effizient getrennt. Zusätzlich wurde nach einer ultraschallunterstützten Oberflächenmodifikation die Trennung von PVC und PET mit unterschiedlichen Massenverhältnissen auch durch eine einstufige Flotation effizient erreicht. Die Reinheit und die Rückgewinnung der gewonnenen Produkte nach der Flotationstrennung betragen bis zu 99,30 % bzw. 99,73 % [Wang et al. 2015c].

In einer anderen Untersuchung wurde gezeigt, dass Tenside eine signifikante Auswirkung auf die Grenzflächeninteraktionen zwischen Kunststoffpartikeln haben. Es konnte gezeigt werden, dass die Adsorption von Tensiden die Dispergierung von Kunststoffpartikeln fördert und die Schwimmfähigkeit vermindert. Bei Anwendung einer pneumatischen, also rührwerkslosen, Flotation kann die Rückgewinnung und Reinheit von abgetrennten Kunststoffen verbessert werden [Wang et al. 2015d]. Eine mögliche Anwendung der Flotation könnte z. B. in der Trennung von ABS und HIPS aus Elektroaltgeräten bestehen, die sich aufgrund geringer Dichteunterschiede kaum durch ein herkömmliches Schwimm-Sink-Verfahren trennen lassen. Damit steht die Flotation jedoch auch in Konkurrenz zur elektrostatischen Separation, die diese Trennung ebenfalls ermöglicht.

Bei einer Schaumflotation in Kombination mit einer Behandlung mit Calciumhypochlorit konnten aus einer Mischkunststofffraktion die Bestandteile von PET, ABS, PS, PC und PMMA jeweils von PVC abgetrennt werden. Unter optimalen Bedingungen wird die Abtrennung dieser Kunststoffe von PVC mit unterschiedlichen Korngrößen effizient erreicht. Die Reinheit von PC, ABS, PMMA, PS und PET liegt

¹⁶ Unter Flotation versteht man ein physikalisch-chemisches Trennverfahren für Feststoffe aufgrund der unterschiedlichen Oberflächenbenetzbarkeit der Partikel. Hierbei nutzt man aus, dass Gasblasen sich leicht an hydrophobe Materialien anlagern und den Partikeln Auftrieb verleihen, so dass diese schwimmen (vgl. z. B. Schubert 1986). Flotationsverfahren werden traditionell insb. bei der Erzaufbereitung eingesetzt.

¹⁷ Schaumflotation ist die am häufigsten anzutreffende Art der Flotation, hierbei wird der feststoffbeladene Schaum der unter hochturbulenten Strömungsverhältnissen entsteht, abgezogen und daraus die Feststoffe gewonnen (vgl. z. B. Schubert 1986).

über 96,8 %, 98,5 %, 98,8 %, 97,4 % bzw. 96,3 %. PVC lässt sich so effizient aus dem gemischten Kunststoffabfall abtrennen [Wang et al. 2017].

Problematisch ist jedoch bisher die Übertragung von Forschungsergebnissen auf die industrielle Praxis. Daher sind für die industrielle Anwendung der Kunststoffflotation weitere Anstrengungen erforderlich [Wang et al. 2015a]. Unklar ist insbesondere, wie ökonomisch die Anwendung einer Flotation in der Aufbereitung von Kunststoffabfällen ist. Der Einsatz einer Flotation ist mit dem Einsatz von zusätzlichen Flotationschemikalien, Wasser und Energie und zusätzlichen Anlagen verbunden. Berücksichtigt werden muss auch, dass eine Flotation sich in Konkurrenz zu anderen Trennverfahren befindet. Eine Einschätzung der ökonomischen wie ökologischen Bedingungen gegenüber möglichen alternativen Verfahren ist aufgrund fehlender praktischer Informationen nicht möglich.

3.3.2.3 Optimierung von Extrudern und Spritzgussmaschinen

Zur Beseitigung von Störstoffen werden bereits heute Schmelzfilter und Schmelzfilter mit automatischer Reinigung bei Extrudern und Spritzgussmaschinen eingesetzt. Mit ihnen können z. B. metallische Beimengungen abgetrennt werden. Auch eine Abtrennung von Kunststoffen kann gelingen, wenn die Schmelzpunkte der Kunststoffe erheblich auseinanderliegen. Aktuelle Entwicklungen bei Schmelzfiltern betreffen insbesondere die Feinheit der Filter. Hier kommen zunehmend feinere Filter zum Einsatz (sogenannte Laserfilter, deren feine Siebstrukturen mit Hilfe von Lasern hergestellt werden). Daneben wird versucht, den Energieverbrauch von Extrudern zu minimieren und die Verweilzeit, damit verbunden die thermische Belastung, der Kunststoffe im Extruder und so die Degradation der Kunststoffe zu verringern [plastverarbeiter 2017].

3.3.2.4 Zusammenfassung - Potenziale bei der Verwertung

In Hinblick auf die Notwendigkeit zur besseren Verwertung der Kunststoffabfälle bestehen technische Potenziale durch

- Verbesserung der Reinigungsleistung der Wäsche
- Verringerung des Energie- und Wassereinsatzes in der Wäsche
- Anforderungsgerechte Aufbereitung mit Verzicht auf nicht benötigte Verfahrensschritte
- Einsatz von neuen Sortiersystemen bei der Trennung von gemahlten Kunststoffabfällen
- Übertragung von Forschungsergebnissen zur Anwendung von Flotationsverfahren in die industrielle Anwendung

3.3.3 Rezyklateinsatz

In Kapitel 2.3.1 wurden verschiedene Produkte ausgewählt, bei denen bereits heute Rezyklate erfolgreich eingesetzt werden. Diese Produkte umgehen i.d.R. typische Probleme beim Einsatz von Rezyklaten, indem sie besonders sortenreine und saubere Herkunftsquellen wählen, insbesondere aber auch indem Einsatzgebiete gewählt werden, in denen an die Farbe der Produkte, den Geruch aber auch die Festigkeit vergleichsweise geringe Anforderungen gestellt werden. Die nachfolgend aufgeführten Möglichkeiten zur Erhöhung des Rezyklateinsatzes, adressieren daher überwiegend Hemmnisse beim Rezyklateinsatz, die bei den Produktbeispielen nicht relevant sind. Eine Anwendung dieser Verfahren kommt daher vielfach für diese Produkte nicht infrage. Es handelt sich jedoch um Verfahren, die generell geeignet sein können, den Rezyklateinsatz bei der Produktion von Kunststoffprodukten zu erhö-

hen sowie gegebenenfalls auch weitere Rezyklatquellen für die (Beispiel)Produkte erschließen könnten.

Die beschriebenen Verfahren befinden sich i.d.R. in der Entwicklung oder werden bisher im Labor- oder Technikumsmaßstab angewendet. Ob eine Übertragung in den großtechnischen Maßstab möglich sein wird, welches Verfahren überhaupt ein wirtschaftliches Potenzial hat und wie die Verfahren in einer lebenszyklusweiten Betrachtung in der Praxis beurteilt werden müssen, ist i.d.R. ebenso offen wie ihre Leistungsfähigkeit in der Praxis. Im Rahmen dieser Betrachtung ist es, schon alleine aufgrund fehlender Daten aus der Praxis, auch nicht möglich zu beurteilen, welches von u.U. mehreren konkurrierenden Verfahren sich letztlich als vorteilhaft erweisen wird.

3.3.3.1 Limitation durch Kontaminationen

In Sekundärkunststoffen können vielfältige Kontaminationen vorkommen. Hierzu können Fremdstoffe (andere Kunststoffe, Metalle etc.) gehören, aber auch Füllstoffe oder Verunreinigungen, z.B. aus Produktresten in Verpackungen. Diese Kontaminationen können das Recycling erschweren oder verhindern, weil sie die Eigenschaften der Sekundärkunststoffe verschlechtern. Andere Kontaminationen, wie etwa das Flammenschutzmittel HBCD (1,2,5,6,9,10-Hexabromcyclododecan) können das Recycling erschweren oder verhindern, weil ihr Einsatz heute nicht mehr zulässig ist [vgl. z.B. Wurbs et al. 2017]. Davon zu unterscheiden sind jedoch Flammenschutzmittel, deren Einsatz nicht generell verboten ist und wo etwa ein geschlossenes Kreislaufsystem eine Lösung sein könnte. Jährlich werden weltweit 2,7 Millionen Tonnen Kunststoffe mit Flammenschutzmitteln (FSM) im Bereich Elektro- und Elektronik-Altgeräte entsorgt. Über die Machbarkeit der Schließung von Materialkreisläufen für FSM-haltige Kunststoffe ist wenig bekannt. Bei Versuchen zur Abtrennung von FSM-haltigen Kunststoffen wurde nachgewiesen, dass beispielsweise das polymere Flammenschutzmittel (pFR)-haltige Copolymer PC/ABS nach Demontage und Kunststoffidentifikation in einem geschlossenen Kreislaufsystem recycelt werden kann. Basierend auf den Dichteverteilungen von Kunststoffen und Abscheidegraden optischer Sortierer wurde für pFR PC/ABS, eine Reinheit von 82% berechnet. Durchgeführte Mischbarkeitstests ergaben, dass für diese Fraktion mindestens eine Verdünnung um den Faktor 10 mit Neuware erforderlich ist, um die Grenzen für Kontaminationen einzuhalten. Darüber hinaus sind höhere Abfallmengen erforderlich, damit eine derartige Aufbereitung wirtschaftlich rentabel wird. Hingegen zeigt sich, dass sich das Closed-Loop-Recycling von pFR PC/ABS aus dem aktuellen Abfallstrom von Flüssigkristallfernsehern unter europäischen Randbedingungen als technisch machbar und wirtschaftlich vertretbar erweist [Peeters et al. 2014].

Radio Frequency Identification Technology (RFID) wird heute vielfach auch im Verpackungsbereich eingesetzt und kann bei der eindeutigen Identifikation von Produkten und den in ihnen enthaltenen Werkstoffen dienen und so ein hochwertiges Recycling erleichtern. Das Vorhandensein von RFID-Etiketten in Kunststoffabfällen kann jedoch u.U. aufgrund der in diesen Geräten enthaltenen Materialien auch zu Problemen in den Recyclinganlagen führen. Die Ergebnisse von Recyclingversuchen im Pilotmaßstab zeigten keinen Qualitätsverlust des recycelten Kunststoffs aufgrund des Vorhandenseins von RFID-Tags. Es konnten jedoch einige Betriebsprobleme während des Recyclingprozesses beobachtet werden, (z. B. die Verstopfung der Siebe (vgl. Kapitel 3.3.2.3), die die Prozessausbeute verminderten und Prozessunterbrechungen verursachten, sowie der Verlust von extrudiertem Kunststoff während des Prozesses. Diese Recyclingbeschränkungen in den Pilotanlagen lassen sich nach Aussagen der Autoren jedoch nicht direkt auf die Industrieanlagen übertragen [Aliaga et al. 2011]. Auch [Kreibe et al. 2017] beschreiben die genannten Betriebsprobleme, weisen jedoch zugleich darauf hin, dass bei Kompatibilität des Materials von Verpackungsmittel und Etikett nicht mit Problemen zu rechnen ist. Die Nutzung von Etikettenmaterialien mit möglichst hoher Kompatibilität zu den Verpackungsmaterialien kann daher eine Möglichkeit sein, die Probleme beim Einsatz von RFID-Etiketten zu verringern. Davon sind die Betriebsprobleme durch die RFID-Antennen jedoch nicht betroffen. Hier können

selbstreinigende Filter eine Lösung sein, die bereits verfügbar, jedoch noch nicht überall im Einsatz sind.

3.3.3.2 Kompatibilisierung

Nicht immer ist es im Zuge der Aufbereitung von Kunststoffabfällen möglich, Störstoffe komplett zu entfernen. Im Falle von Fremdkunststoffen, die andere Eigenschaften als der Zielkunststoff aufweisen, kann dies zu Unverträglichkeiten (Inkompatibilitäten) und Problemen bei der weiteren Verarbeitung des Rezyklats führen. Um die negativen Auswirkungen von Verunreinigungen mit inkompatiblen Fremdkunststoffen zu verringern, können Additive zur Erhöhung der Kompatibilität eingesetzt werden. Hierzu steht eine Reihe von Kompatibilisatoren zur Verfügung [vgl. Pfaender 2016]. Beispielsweise zählen High Impact Polystyrol (HIPS), Acrylnitril-Butadien-Styrol (ABS), Polystyrol (PS) und (meist mit Talkum) gefülltes Polypropylen (PP) zu den wichtigsten Kunststoffsorten in Elektrogeräten. Hierbei handelt es sich jeweils um Gruppen von Kunststoffen, die aufgrund ähnlicher physikalischer Eigenschaften (Dichte) durch übliche Sortierverfahren nicht in die Unterfraktionen getrennt und von den jeweiligen Fremdkunststoffen vollständig abzutrennen sind. Neben einer Schwimm-Sink-Trennung kommen daher zusätzlich elektrostatische Separationsverfahren zum Einsatz (vgl. Kapitel 2.2.4.6). Zur Verbesserung des Recyclings kann es weiterhin hilfreich sein, die Kompatibilität der verschiedenen PS-Typen zu verbessern.

ABS ist in HIPS nur teilweise mischbar und führt zu einer Verringerung der Schlagzähigkeit. Aufgrund der großen Ähnlichkeit ist die Sortierung dieser Materialien jedoch nur schwer möglich (vgl. Kapitel 3.3.2.2). Zugleich hat die chemische Ähnlichkeit Vorteile bei einer Kompatibilisierung der beiden Polymere [Perrin et al. 2016]. Die Kompatibilisierung kann ein Weg zur Verbesserung des Recyclings von Kunststoffen aus Elektroaltgeräten bei niedrigen Kosten und einfacher Handhabung sein [Yamila et al. 2016].

Neben der chemischen Kompatibilisierung, etwa durch den Einsatz von Additiven, besteht auch eine potenzielle Möglichkeit in der Mikronisierung (Feinvermahlung) beim Recycling polymerer Mehrstoffprodukte (Kunststoffverbunde), die durch mechanische Verfahren nicht getrennt werden können. In einem Versuch [Ashton et al. 2016] wurde ein Kunststoffverbund aus PP, PA und EPDM unter Zusatz von LLDPE (als Matrix) fein vermahlen, extrudiert und mit Primärkunststoff, in dem Fall LLDPE, verglichen. Der Versuch zeigt, dass es hierbei zu Wechselwirkung zwischen den Materialien kommt, bei der unterschiedliche mechanische Eigenschaften sowohl günstig als auch ungünstig beeinflusst werden können. Eine Verwendung der resultierenden Materialien in neuen Produkten erscheint möglich [Ashton et al. 2016]. Die Mikronisierung ist jedoch mit einem erheblichen Energieverbrauch für den zusätzlichen Aufbereitungsaufwand verbundenen.

Neben den Verunreinigungen durch Fremdkunststoffe treten auch andere Kontaminationen auf, deren Wirkung durch Additive verringert werden kann. Durch Metalldesaktivatoren lässt sich die Wärmebeständigkeit bei metallischen Verunreinigungen verbessern und durch Kopplungsagentien die Haftungseigenschaften von Füll- und Verstärkungsstoffen [Pfaender 2016].

Eine verstärkte Nutzung von Additiven kann eine Möglichkeit sein, mit Kontaminationen beim Kunststoffrecycling umzugehen und einen möglichst hochwertigen Einsatz von Sekundärkunststoffen zu ermöglichen. Bei der Auswahl solcher Additive und der stofflichen Zusammensetzung von Kunststoffen insgesamt sollten jedoch auch immer Umwelt- und Gesundheitsaspekte berücksichtigt werden.

3.3.3.3 Veränderte Produktgestaltung

Durch die Produktgestaltung kann das Recycling erheblich beeinflusst werden. Dies betrifft z. B. die Trennbarkeit und Identifikation von Kunststoffen. In einer Verbesserung der Recyclingfähigkeit kann

ein erhebliches Potenzial zur Erhöhung des Kunststoffrecyclings liegen. Zugleich kann hier ein Zielkonflikt zwischen unterschiedlichen Aspekten der „Circular Economy“ liegen. So besteht die Möglichkeit, das Gewicht von Verpackungen bei gleicher Barrierefunktion zu reduzieren, hierbei jedoch etwa durch mehrschichtige Verbundmaterialien die Recyclingfähigkeit zu verschlechtern. Ebenso können etwa andere Flaschenformen zu einem geringeren Materialeinsatz führen, jedoch aufgrund höherer Anforderungen an eine enge Molmassenverteilung den Synthesaufwand verändern und insbesondere den Einsatz von Rezyklaten in diesen Bereichen erschweren. Eine Verringerung von Produktgewichten kann hier im Zielkonflikt mit einer Vereinfachung der Kreislaufführung liegen. Aus Gründen des Umwelt- und Ressourcenschutzes sollten jedoch die Recyclingfähigkeit und auch der Rezyklateinsatz einen größeren Stellenwert beim Design von Kunststoffprodukten erhalten.

3.3.3.4 Zusammenfassung - Potenziale beim Rezyklateinsatz

In Hinblick auf den Rezyklateinsatz bestehen technische Potenziale durch

- Nutzung von verbesserten Verfahren zur Abschätzung von Kontaminationen und zur Charakterisierung von Kunststoffen
- Kompatibilisierung von Kunststoffen um die Toleranz gegenüber Verunreinigungen zu erhöhen
- Veränderte Produktgestaltung

3.4 Die Verfahren im Überblick

Die identifizierten Verfahren (vgl. Tabelle 18) zielen insbesondere auf eine Verbesserung der Qualität der Rezyklate ab. Die Ausbeute an Kunststoff wird i.d.R. verringert, da Störstoffe und Verunreinigungen effektiver beseitigt werden und damit die Gesamtmasse verringert wird. Durch eine Verbesserung der Qualität ist es jedoch u.U. möglich, den Anteil an Rezyklat im neuen Produkt zu erhöhen.

Die Verfahren sind häufig mit einem erhöhten Energieverbrauch verbunden und gehen teilweise mit einem erhöhten Verbrauch von Wasser und Betriebsmitteln einher. Der zusätzliche Energieaufwand zusätzlicher Detektoren ist dabei relativ gering, wohingegen etwa der Energieaufwand für eine Heißwäsche hoch ist. Quantitative Angaben sind jedoch kaum möglich, da sie von einer Vielzahl von Parametern abhängen und nicht allgemein angegeben werden können. Ähnliches gilt für allgemeingültige Aussagen zur verbesserten Anlagengestaltung, die Verfahren sollten individuell in Hinblick auf die Abfälle und die erwarteten/benötigten Produkte ausgewählt werden.

Tabelle 18: Wirkungen der Maßnahmen (++ = deutlich mehr; + = mehr; o = unverändert; - = weniger; -- deutlich weniger)

	Maßnahme	Energieverbrauch	Betriebsmittel	Wasserverbrauch	Qualität	Ausbeute	Rezyklatanteil
Sortierung	weitere Detektoren	+	o	o	+	- bis +	+
	Einsatz von Markern	+	o	o	+	+	+
	Sortierung nach Form und Material	+	o	o	+	+	+
Verwertung	Heißwäsche	++	o	o	+	o	+
	Einsatz mehrerer Becken zur Wäsche	o	o	+	+	o	+
	Andere Waschverfahren (energie- und wassersparende Verfahren)	-	o	-	o	o	o
	Einsatz von Tensiden	o	+	o	+	o	+
	Lasersortierung	+	o	o	+	-	+
	Flakesortierung	+	o	o	+	- bis +	+
	Flotation	+	+	+	+	o	+
	Kontaminationen besser einschätzen	o bis +	o	o	+	+	+
Rezyklateinsatz	Kompatibilisierung	o bis +	+	o	+	+	+
	Vermeidung von Verbunden	+	o	o	o	+	o

Zahlreiche der betrachteten Verfahren lassen sich nicht leicht in bestehende Anlagen integrieren. Sie erfordern größere Umbaumaßnahmen oder lassen sich nur in Neuanlagen realisieren.

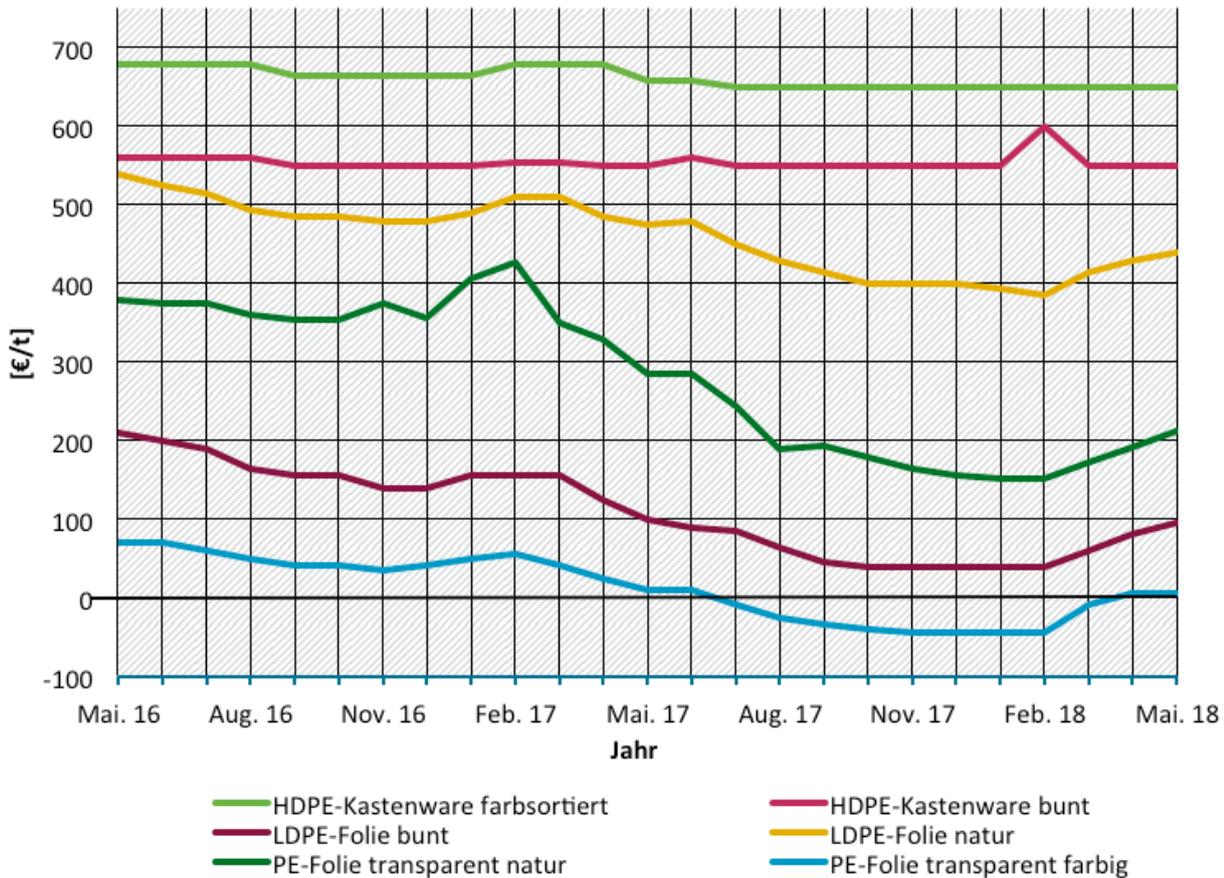
Tabelle 19: Umsetzbarkeit der Maßnahmen (++ = deutlich mehr; + = mehr; o = unverändert; - = weniger; -- deutlich weniger)

	Maßnahme	Modellcharakter	Umsetzbarkeit
Sortierung	weitere Detektoren	o	aufwendig oder in Neuanlagen
	Einsatz von Markern	+	möglich
	Sortierung nach Form und Material	+	Neuanlagen

	Maßnahme	Modellcharakter	Umsetzbarkeit
Verwertung	Heißwäsche	o	Neuanlagen
	Einsatz mehrerer Becken	+	Neuanlagen
	Andere Waschverfahren	+	Neuanlagen
	Einsatz von Tensiden	+	möglich
	Lasersortierung	+	aufwendig oder in Neuanlagen
	Flakesortierung	o	Neuanlagen
	Flotation	++	langfristig in Neuanlagen
	Kontaminationen besser einschätzen	+	möglich
Rezyklateinsatz	Kompatibilisierung	+	möglich
	Vermeidung von Verbunden	o	möglich

Die Einführung neuer Technologien beim Kunststoffrecycling hat durch zusätzliche Investitionen, Veränderungen der Betriebskosten, aber auch möglichen Veränderungen bei den erzielbaren Erlösen für die Rezyklate einen erheblichen Einfluss auf die ökonomischen Rahmenbedingungen. Eine quantitative Abschätzung ist hierbei kaum möglich, da einerseits die Anlagen- und Betriebskosten, insbesondere innovativer Technologien, kaum bekannt oder abschätzbar sind, ein hoher Einfluss von Prozessparametern wie etwa dem Durchsatz besteht, andererseits aber auch ein hoher Einfluss durch die Preisentwicklung für Kunststoffrezyklate vorhanden ist. Hier besteht ein erheblicher Unsicherheitsfaktor für Investitionen in neue Technologien, denn eine Reihe von Rezyklaten unterliegen teils deutlichen Preisschwankungen (vgl. Abbildung 4), wobei die Preisentwicklung auch in einem hohen Maße vom Angebot bestimmt wird und insgesamt kaum vorhergesagt werden kann. Gelingt es, den Verkaufspreis durch eine Erhöhung der Qualität zu verbessern, kann sich ein erhöhter Aufwand auch ökonomisch lohnen. Sind die Preise jedoch insgesamt gering, ist u.U. eine aufwendige Aufbereitung ökonomisch nicht lohnend.

Abbildung 28: Preisentwicklung ausgewählter Altkunststoffe. Datengrundlage: EUWID Recycling und Entsorgung, versch. Ausgaben 2016-2018



Der Einsatz zusätzlicher Detektoren ist in der Regel mit hohen Investitionen, aber relativ geringen Betriebskosten verbunden. Andere Technologien, wie etwa eine Heißwäsche weisen infolge des hohen Energieverbrauchs vor allem hohe Betriebskosten auf. Daneben gibt es auch Verfahren, etwa Flotation, bei denen man sowohl von hohen Investitions- als auch Betriebskosten ausgehen muss.

Eine qualitative Einschätzung der ökonomischen Auswirkungen der Verfahren findet sich in Tabelle 20.

Tabelle 20: Ökonomische Aspekte der Maßnahmen (++ = deutlich mehr; + = mehr; o = unverändert; - = weniger; -- deutlich weniger)

	Maßnahme	Investitionskosten	Betriebskosten	Erlös für Rezyklate
Sortierung	weitere Detektoren	++	+	+
	Einsatz von Markern	o	+	- bis +
	Sortierung nach Form und Material	++	+	+

	Maßnahme	Investitionskosten	Betriebskosten	Erlös für Rezyklate
Verwertung	Heißwäsche	+	++	+
	Einsatz mehrerer Becken	++	+	+
	Andere Waschverfahren	++	-	0
	Einsatz von Tensiden	0	+	+
	Lasersortierung	++	+	+
	Flakesortierung	++	+	+
	Flotation	++	++	+
	Kontaminationen besser einschätzen	+	+	0
Rezyklateinsatz	Kompatibilisierung	+	+	0
	Vermeidung von Verbunden	+	0	+

4 Ökologische Betrachtung

In diesem Kapitel sollen der Stand der Technik im Recycling von Kunststoffen und die Möglichkeiten zur Entwicklung der technischen Potenziale, die in den Kapiteln 2 und 3 dargelegt und ausführlich erläutert wurden, aufgegriffen und aus ökologischer Sicht bewertet werden. Die Bewertung erfolgt vergleichend zueinander. Ziel ist es, die mit einer technischen Innovation verbundenen Umweltentlastungserfolge zu erkennen und zu beschreiben.

4.1 Allgemeine Rahmenbedingungen

4.1.1 Abfallmassenströme und ihre Zusammensetzung

Das Forschungsprojekt zielt auf die Analyse der technischen Möglichkeiten zur Steigerung des Kunststoffrecyclings und der Rückführung der Kunststoffrezyklate in den Wirtschaftskreislauf. Diese Analyse erfolgt am Beispiel von Abfallfraktionen, die nicht nur aus Kunststoffen bestehen, sondern Abfallgemische darstellen. Aufwand und Nutzen einer Optimierung lassen sich nur nachvollziehen, wenn eine Allokation auf die Kunststoffe durchgeführt werden kann.

In einem ersten Schritt galt es deshalb, diese Abfallarten alleine für die Kunststoffanteile in ihrer Zusammensetzung zu beschreiben (Tabelle 21). Hierzu mussten zahlreiche Annahmen getroffen werden. Für viele dieser Abfallfraktionen gibt es nur grobe Angaben zur materiellen Zusammensetzung. Angaben zur Zusammensetzung innerhalb der Kunststofffraktion fehlen fast immer.

Dies gilt auch für den **gemischten Bauabfall**. Die Zusammensetzung der Abfallfraktion wurde daher aus den Informationen abgeleitet, die über die Mengenanteile der in Bauprodukten eingesetzten Kunststoffsorten zu erhalten waren. Die Herleitung erfolgte aus der Auswertung einer Studie für das Umweltbundesamt: Entwicklung von Instrumenten und Maßnahmen zur Steigerung des Einsatzes von Sekundärrohstoffen, die von Wuppertal-Institut und dem Büro u.e.c. Berlin erstellt und im Jahr 2016 veröffentlicht wurde [Wilts et al. 2016]. In dieser Studie sind die jeweiligen Mengen an verarbeiteten Kunststoffsorten im Baubereich aufgeführt, die ins Verhältnis zueinander gesetzt wurden (Tabelle 21). Hier sind Angaben zu Folien nicht getrennt ausgewiesen. Vereinfacht wurde angenommen, dass der Folienanteil in den Bauabfällen dem im gemischten Gewerbeabfall entspricht. Nach einer weiteren Studie für das Umweltbundesamt [Dehne et al. 2015] sind 42 % der Kunststoffe Folien. Es wurde angenommen, dass diese Folien im Baubereich aus LDPE und PVC bestehen und dies in einem für Kunststoffe im Baubereich typischen Verhältnis [Wilts et al. 2016] zueinander. Es wird zudem unterstellt, dass die Folien sämtlich eine Größe von > DIN A4 aufweisen.

Für die Beschreibung des Kunststoffanteils im **gemischten Gewerbeabfall** konnte auf Zahlen aus einer Studie: Stoffstromorientierte Lösungsansätze für eine hochwertige Verwertung von gemischten gewerblichen Siedlungsabfällen [Dehne et al. 2015] zurückgegriffen werden, die von u.e.c. Berlin im Auftrag des Umweltbundesamtes erstellt wurde. Dort sind neben Folien < DIN A4 und > DIN A4 EPS, die relativen Mengen an Eimern/Kanistern, sonstigen formstabilen Kunststoffen und Schaumstoffen und Umreifungsbänder ausgewiesen. Für die Folien wurde 100 % LDPE angesetzt, für die Umreifungsbänder 100 % PP. Für alle anderen Kunststoffabfälle außer EPS wurde eine Zusammensetzung von 50 % HDPE und 50 % PP angenommen.

Nach [Hahnenkamp et al. 2017] handelt es sich bei den im **Sperrmüll** enthaltenen Kunststoffen zu meist um Produkte aus Hartkunststoffen. Daraus abgeleitet wurde eine Zusammensetzung aus jeweils 50 % HDPE und PP angesetzt. Zudem wurde vereinfachend davon ausgegangen, dass im Sperrmüll keine Folien enthalten sind.

In Elektro- und Elektronikartikeln sowie in Fahrzeugen sind Kunststoffe verbaut. Werden diese als Abfallmassen aufbereitet, fällt eine **Schredder-Leichtfraktion (SLF)** an, in der diese Kunststoffe kon-

zentriert sind. Auch für diesen Abfallmassenstrom liegen keine auszeichnenden Informationen vor. Für Altfahrzeuge werden errechnete Mittelwerte aus Angaben zu Spannweiten in [Mudgal, S. et al. (2011)] und [Sander et al. 2017] herangezogen, für Elektro- und Elektronikartikel Angaben aus [Schlummer 2009]. Die Kunststoffströme Polyurethan, PC und POM sowie weitere Sonstige, die in Tabelle 21 als Summenwert gelistet sind, sind nicht Gegenstand dieser Studie.

Im Gegensatz zu allen oben aufgeführten Abfallfraktionen ist der Informationsstand zu den **Leichtverpackungen** (LVP) deutlich am besten. Zur Beschreibung der Zusammensetzungen nach Kunststoffsorten und Kunststofffraktionen wurde auf eine Datenbank des Projektpartners u.e.c. Berlin zurückgegriffen. Die Fraktion Kunststoffhohlkörper (>5 L) (Abbildung 4) aus stoffgleichen Nichtverpackungen wird als 50 % HDPE und 50 % PP angesetzt. Unter „Sonstige, Gemisch“ sind in Tabelle 21 alle Kunststoffe enthalten, die nicht einer Kunststoffsorte zugeordnet werden können, weil sie bspw. als Verbunde vorliegen.

Tabelle 21: Die Zusammensetzung der Abfallfraktionen nach Kunststoffsorten

	Bauabfälle	Gewerbeabfälle	Sperrmüll	Elektroaltgeräte SLF	Altfahrzeuge SLF	LVP
PE	20 %	25 %	50 %	0 %	6 %	7 %
PP	8 %	26 %	50 %	18 %	35 %	14 %
PVC	13 %	0 %	0 %	4 %	12 %	0,6 %
PS	3 %	0 %	0 %	0 %	0 %	5 %
EPS	12 %	4 %	0 %	0 %	0 %	3 %
PET	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	7 %
ABS	1 %	0 %	0 %	33 %	17 %	0 %
PA	1 %	0 %	0 %	3 %	7 %	0 %
HIPS	0 %	0 %	0 %	19 %	0 %	0 %
Folien LDPE	3 %	44 %	0 %	0 %	0 %	36 %
Folien PVC	39 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0,3 %
Folien PP	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	12 %
Sonstige, Gemisch	-	-	-	-	-	15 %
Nicht untersuchungsrelevant	-	-	-	23 %	22 %	-

4.1.2 Betrachtete Szenarien

Für jede der diskutierten Abfallarten werden jeweils die mit einer Verwertung verbundenen Lasten aufbilanziert und dem damit erreichbaren Nutzen gegenübergestellt. Entscheidend für die ökologische Bewertung ist, wie viel welcher Kunststoffsorten der betrachteten Abfälle über Sortierung und Aufbereitung entsprechende Primärkunststoffarten ersetzen und wie viel davon bspw. als Sortier- und Verwertungsreste energetisch verwertet wird.

Betrachtet werden alle Schritte ab Sortierung mit Aufbereitung und Entsorgung der nicht verwerteten Reste. Sowohl die Sammlung der verschiedenen Abfälle sowie der letztendliche Einsatz der Rezyklate

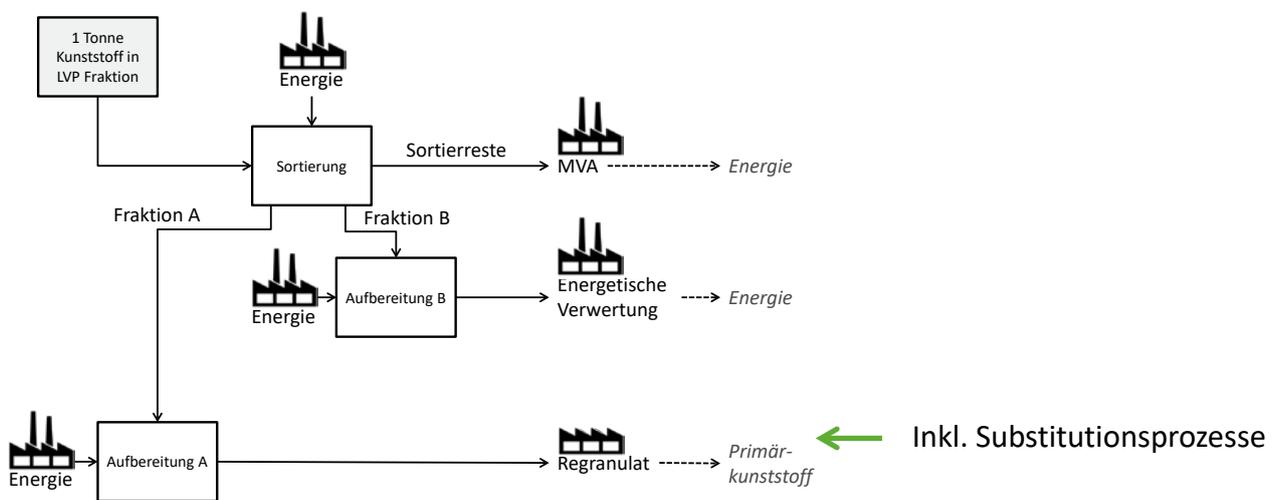
in der Kunststoffindustrie ist nicht Gegenstand der Betrachtung. Es wird davon ausgegangen, dass der Einsatz von Kunststoffzyklen in der Produktion von Kunststoffwaren so erfolgen kann, dass die Produktionsprozesse im Wesentlichen beibehalten werden können. Abweichungen lassen sich im Rahmen der Studie zudem nicht beziffern. Die Betrachtung fokussiert zudem auf den eigentlichen Kunststoffstrom. Andere Materialien werden nicht mitbilanziert, um eine Allokation von Aufwand und Nutzen auf die Kunststoffe zu erreichen. Daher sind die Störstoffe, die mit diesen Strömen ins System eingetragen werden, aber keine Kunststoffe darstellen, nicht Gegenstand der Betrachtung. Die Störstoffe bedingen aber einen größeren Strombedarf in der Sortierung und der nachfolgenden Aufbereitung, der ganz dem Zielprodukt Kunststoff anzulasten ist, so dass der Strombedarf in Sortierung und Verwertung jeweils entsprechend nach oben korrigiert wird.

Der Referenzfluss für die Ökobilanzierung ist die Verwertung von jeweils 1.000 kg Kunststoffen ohne Störstoffe und ohne Polyurethan, PC, POM und weitere Sonstige. Für alle Abfallarten wurden jeweils zwei Szenarien unterschieden: der jeweilige Stand der Technik (siehe Kapitel 2) und das Optimierungspotenzial (Kapitel 3)).

4.1.3 Energiemix 2030

Die Bewertung einer Verwertung von Kunststoffabfällen wird stark durch die Frage der Energiebereitstellung beeinflusst. Das in den einzelnen Prozessen der Sortierung und Aufbereitung benötigte Betriebsmittel ist vor allem Strom. Die mit der Verwertung verbundenen Substitutionserfolge sind ebenfalls stark von der Frage der Energie bestimmt. Dies gilt nicht nur für die energetische Verwertung. Auch die Herstellung von Primärkunststoffen ist mit einem relevanten Einsatz von Energie verbunden.

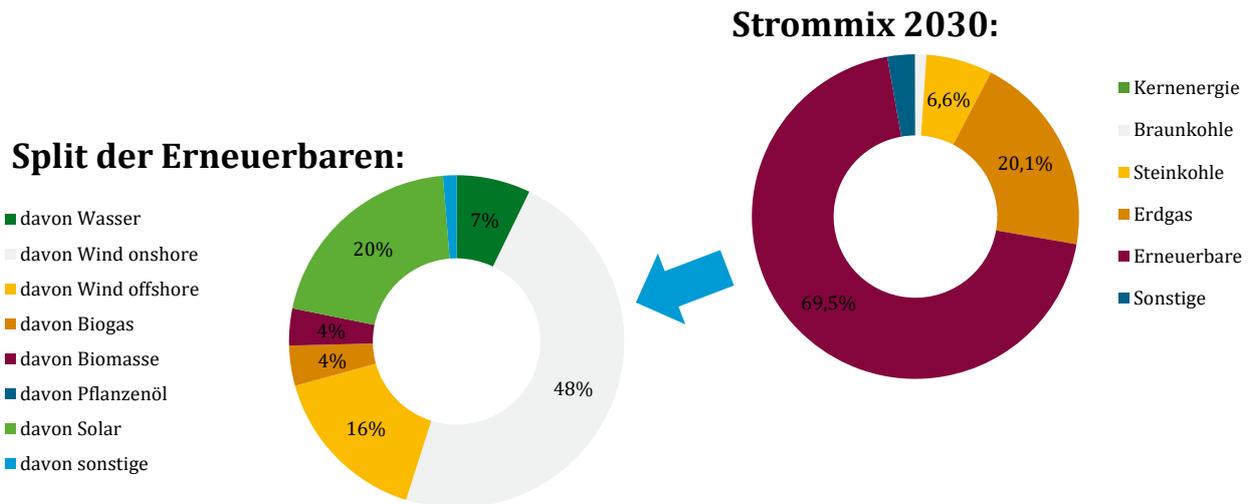
Abbildung 29: Die Verwertung von Kunststoffen und der Energieeinsatz



Quelle: Eigene Darstellung, © ifeu

Ein Vergleich des Standes der Technik mit einem Szenario, das die technischen Potenziale beschreiben soll, ist immer mit einer Zeitverschiebung verbunden. Die Bereitstellung von Strom und Wärme erfolgt derzeit mit einem deutlich anderen Energieträgermix, als dies zukünftig zu erwarten ist. Um die mit der Verschiebung in der Energiebereitstellung verbundenen umweltseitigen Effekte nicht mit denen der Optimierung der Technik zu vermischen, muss ein einheitlicher Energiemix zugrunde gelegt werden.

Abbildung 30: Energiemix in der Stromerzeugung 2030



Für den potenziellen Energiemix im Jahr 2030 wird das sogenannte Klimaschutzszenario 95 aus der Studie [Repenninger et al. 2015] zugrunde gelegt. Dieses zielt darauf ab, die Treibhausgasemissionen um 95 % zu senken. Voraussetzung dafür ist, dass knapp 70 % des Stromes aus erneuerbaren Quellen bereitgestellt werden, davon knapp 2/3 aus Windkraft (Abbildung 30).

Damit verbunden ist fast schon auch ein Paradigmenwechsel. Die Bereitstellung von Strom aus der energetischen Verwertung von Kunststoffabfällen verliert deutlich an Bedeutung. Ist mit der Strombereitstellung heute über die Substitution erheblicher Kohlestromanteile auch die Einsparung erheblicher Umweltlasten verbunden, wird die werkstoffliche Verwertung von Kunststoffabfällen zukünftig erheblich an Bedeutung gewinnen. Dies gilt umso mehr, wenn der damit verbundene Substitutionserfolg die Einsparung der Produktion von primären Gütern auf Basis fossiler Rohstoffe betrifft.

Das Energieszenario 2030 wird verbunden mit einer Bereitstellung von Wärme, die zu 100 % auf Erdgas basiert.

4.2 Schritte in der Verwertung – Festlegungen zu den Modulen

Nachfolgend werden die mit der Verwertung der Abfallfraktionen bzw. der darin enthaltenen Kunststoffe verbundenen Schritte beschrieben und die damit verbundenen Annahmen benannt.

4.2.1 Sortierung

Bei jeder Sortierung verbleiben Reste bzw. Kunststoffe, die als Fehlanteil in anderen Nicht-Kunststofffraktionen in den weiteren Aufbereitungsschritten entsorgt werden müssen. Da diese schlussendlich verbrannt werden, werden sie hier wie Sortierreste behandelt und zu diesen addiert. Für diese wird eine Verwertung zu 78 % im Zementwerk und zu 22 % in der MVA angesetzt [Dehoust et al. 2016], für PVC zu 100 % in der MVA. Für den Anteil Richtung Zementwerk wird unterstellt, dass zunächst eine Aufbereitung zu Ersatzbrennstoff (EBS) erfolgen muss, wofür ein Strombedarf von 320 kWh/t angesetzt wird, genauso wie für die Aufbereitung von Mischkunststoffen zum Einsatz in Zementwerken (Kapitel 4.2.2). Es wird angenommen, dass 80 % des Inputs in die EBS-Aufbereitung anschließend ins Zementwerk gelangt und 5 % in die MVA, der Rest stellt demnach insbesondere

Feuchtigkeitsverluste dar. In der MVA wird der für die verschiedenen Kunststoffsorten ermittelte Wasseranteil (Kapitel 4.2.2) angesetzt. Die verschiedenen Elementarzusammensetzungen und Heizwerte der einzelnen Kunststoffsorten werden berücksichtigt.

Der Strombedarf in der Sortierung nach dem Stand der Technik bezieht sich auf den gesamten Input in die Sortieranlage inklusive Störstoffe. Da im Modell Störstoffe außerhalb des Kunststoffbereichs nicht betrachtet werden, wird der Stromverbrauch entsprechend hochskaliert, um dem tatsächlichen Bedarf zu entsprechen.

Gemischter Bauabfall

Hintergrund für den Stand der Technik bilden Daten aus [Dehne et. al. 2015]. Nach einer dort beschriebenen Modellanlage nach Stand der Technik zur Sortierung gemischter gewerblicher Siedlungsabfälle werden Eimer, Kanister und sonstige formstabile Kunststoffe zu 47,9 % in die Ziel-Kunststoffsortenfraktion (Polyolefine PE/PP) überführt, Folien zu 65,4 % und EPS zu 18 %. Im Mittel über alle Kunststoffe liegt die Quote bei 50,1 %. Mangels Datengrundlage für gemischte Bauabfälle werden hierfür die Ergebnisse für die Sortierung gemischter gewerblicher Siedlungsabfälle zugrunde gelegt. Die dort ermittelte Quote für Eimer, Kanister und sonstige Folien (47,9 %) wird jeweils für die Polyolefine PE und PP angenommen und für PVC diejenige für das Mittel aller Kunststoffe (50,1 %) (Tabelle 22). Die Sortierung von gemischten Bauabfällen kennt keine Mischkunststofffraktion (MKS-Fraktion).

Für eine Optimierung der Sortierung werden pauschal weitere Detektoren und eine Sortierung nach Form und Material angenommen, wofür ein zusätzlicher Strombedarf von 10 kWh/t bezogen auf den gesamten Inputstrom in die Sortierung angesetzt ist. Dadurch wird eine Überführung aller im Bauabfall vorhandenen Kunststoffarten zu 70 % in die Zielfraktion angenommen, eine Mischkunststofffraktion entsteht wiederum keine.

Gemischter Gewerbeabfall

Hintergrund für den Stand der Technik bilden wiederum die Daten aus [Dehne et. al. 2015], nach denen in einer Modellanlage nach Stand der Technik zur Sortierung gemischter gewerblicher Siedlungsabfälle Eimer, Kanister und sonstige formstabile Kunststoffe (Annahme: PE, PP) zu 47,9 % in die Ziel-Kunststoffartenfraktion überführt werden können, bei Folien sind es unabhängig von der Größe 65,4 %, bei EPS 18 % (Tabelle 22). Es wird angenommen, dass keine Mischkunststofffraktion entsteht.

Mit einer pauschalen Optimierung der Sortierung durch weitere Detektoren und einer Sortierung nach Form und Material wird wiederum ein um 10 kWh/t steigender Strombedarf bezogen auf den gesamten Inputstrom unterstellt. Dann wird eine Überführung aller im Gewerbeabfall vorhandenen Kunststoffarten zu 70 % in die Zielfraktion angenommen, eine Mischkunststofffraktion entsteht wiederum keine.

Sperrmüll

Auch für den Sperrmüll werden die Daten aus [Dehne et al. 2015] verwendet und angenommen, dass HDPE und PP sich zu jeweils 47,9 % in die Zielfraktion überführen lassen (Tabelle 22), ohne dass eine MKS-Fraktion entsteht.

Mit einer pauschalen Optimierung der Sortierung durch weitere Detektoren und einer Sortierung nach Form und Material wird auch hier ein um 10 kWh/t steigender Strombedarf bezogen auf den gesamten Inputstrom veranschlagt. Dann wird eine Überführung der im Sperrmüll vorhandenen Kunststoffsorten HDPE und PP zu 70 % in die Zielfraktion angenommen, eine Mischkunststofffraktion entsteht wiederum keine.

Elektro-/Elektronikaltgeräte und Altfahrzeuge

Die Kunststoffe in Elektro-/Elektronikaltgeräten (EAG) und Altfahrzeugen werden vor der Aufbereitung teilweise im Rahmen der manuellen Demontage vorsortiert, sonst aber nicht weiter automatisch sortiert, sondern nur von den anderen Bestandteilen (wie z. B. Metallen) getrennt (vgl. Kapitel 2.1.3 und 2.1.4). Für die Aufbereitung der Schredderrückstände in Post-Schredder-Verfahren wird ein spezifischer Strombedarf analog dem für gemischten Gewerbeabfall angesetzt. Dabei entsteht ein Mix an Kunststoffsorten, der dann in der Aufbereitung (Kapitel 4.2.2) in diese getrennt und zu Rezyklaten verarbeitet wird. Die Optimierung erfolgt nur in der Aufbereitung, weshalb sich in der Sortierung auch kein erhöhter Strombedarf für das optimierte Szenario ergibt. Die enthaltenen Kunststoffe werden in Summe abgetrennt und ungeeignete dann teilweise in der Aufbereitung ausgeschleust.

Leichtverpackungen

Für die Angaben zu den Sortiererfolgen für die Abfallfraktion Leichtverpackungen wird auf Datenbanken des Büros u.e.c. Berlin zurückgegriffen (Tabelle 22).

Mit einer pauschalen Optimierung der Sortierung durch weitere Detektoren und einer Sortierung nach Form und Material ist wiederum ein um 10 kWh/t steigender Strombedarf bezogen auf den gesamten Inputstrom angesetzt. Dann wird wie bei den anderen Abfallarten eine Überführung aller im LVP-Kunststoffgemisch vorhandenen Kunststoffsorten zu 70 % in die Zielfraktion angenommen, auch der Folien < DIN A4, die im Status Quo hauptsächlich in der Mischkunststofffraktion landen. Zusätzlich wird davon ausgegangen, dass jeweils aus den einzelnen Kunststoffsorten noch 5 % in eine Mischkunststofffraktion ausgetragen werden. Hinzu kommen sonstige Gemische im Input, die dann zu 75 % in die Mischkunststofffraktion gebracht werden und nicht mehr wie im Stand der Technik überwiegend im Sortierrest verbleiben.

Tabelle 22: Überblick über die angesetzten Selektivitäten in der Sortierung im Stand der Technik

	Bauabfälle: Zielfraktion	Gewerbeabfälle: Zielfraktion	Sperrmüll: Zielfraktion	LVP: Zielfrak- tion	LVP: MKS- fraktion
PE	48 %	48 %	48 %	49 %	5 %
PP	48 %	48 %	48 %	43 %	14 %
PVC	50 %	-	-	0 %	9 %
PS	0 %	-	-	38 %	18 %
EPS	18 %	18 %	-	0 %	35 %
PET	-	-	-	70 %	9 %
ABS	0 %	-	-	-	-
PA	0 %	-	-	-	-
HIPS	-	-	-	-	-
Folien < DIN A4	-	65 %	-	0 %	69 %
Folien > DIN A4	65 %	65 %	-	29 %	24 %
Mischfraktion	-	-	-	-	15 %

4.2.2 Aufbereitung

Die nachfolgende Aufbereitung unterscheidet kaum noch zwischen den Abfallarten. Es wird davon ausgegangen, dass sich die Sortierfraktionen für einzelne Kunststoffsorten unabhängig von der Herkunft aus unterschiedlichen Abfallarten gleichen. Die Rezyklatausbeuten für die einzelnen Kunststoffsorten orientieren sich an den Angaben in Kapitel 2.2.4. Die Rechenwerte werden für die Ökobilanz auf den reinen Kunststoffdurchsatz bezogen und entsprechend angepasst. Die Rezyklatausbeute bezüglich dieses kleineren Massestroms fällt entsprechend, wie unten angegeben, größer aus. Der Wassergehalt, der die Rezyklatausbeute schmälert, ist für alle Kunststoffsorten jeweils mit 8 % angesetzt, bei Folien liegt der Wert bei 13 %. Für die Sortierfraktion Mischkunststoffe wird von einem Wassergehalt von 15 % ausgegangen. Die Werte für die Wassergehalte sind aus Angaben in [Dehoust & Christiani 2012] abgeleitet.

Bei einer Aufbereitung verbleiben entsprechend den Rezyklatausbeuten Reste. Über die Fraktionen hinweg wird für diese zu 98 % eine energetische Verwertung in Zementwerken angesetzt und zu 2 % eine Entsorgung über eine MVA [Dehoust et al. 2016].

Aufbereitung der Kunststoff-Sortierfraktionen

Für die Aufbereitung nach dem Stand der Technik lässt sich für die unterschiedlichen Kunststoffsorten aus der Sortierung der Abfallmassen ohne Schredder-Leichtfraktion und Mischkunststoffe von einer Ausbeute von 96,9 % bezogen auf die Trockensubstanz und den jeweiligen Kunststoffanteil ohne Störstoffe ausgehen. Nur bei formstabilen Teilen aus PET im Nicht-Pfandbereich wird mit 90 % eine etwas niedrigere Ausbeute angenommen. Für die technischen Kunststoffe ABS, PA, HIPS wird aufgrund der Verunreinigung mit Flammschutzmitteln hingegen nur von einer Ausbeute von 65 % ausgegangen (s. auch unten unter Aufbereitung der Schredder-Leichtfraktion). Die o.g. Ausbeuten in der Aufbereitung sind dabei rein theoretischer Natur für die Modellierung der reinen trockenen Kunststoffe, in der Praxis liegen sie wie in Kapitel 2.2.4 angegeben aufgrund von Feuchtigkeitsverlusten und Störstoffen mit teilweise <70 % deutlich niedriger. Dabei besteht eine starke Abhängigkeit vom jeweils betrachteten Stoffstrom und dessen Störstoffanteil.

Für diese Rezyklate wird davon ausgegangen, dass sich mit ihnen jeweils zu 90 % Primärkunststoffe mit den in Kapitel 4.2.3 benannten Substitutionsfaktoren substituieren lassen und 10 % sich nur in Richtung einfacher Kunststoffprodukte (bspw. Palisaden) verarbeiten lassen, die ansonsten aus Beton oder Holz hergestellt werden würden.

Dieser Aufbereitungserfolg ist mit einem entsprechenden Aufwand zu erzielen. Der Strombedarf für die jeweiligen Kunststoffsorten-Fraktionen ist Kapitel 2.2.4 entnommen. Da im Modell Störstoffe außerhalb des Kunststoffbereichs nicht betrachtet werden, wird der Stromverbrauch entsprechend hochskaliert, um dem tatsächlichen Bedarf zu entsprechen.

Für die Aufbereitung der technischen Kunststoffe ist in Ermangelung von Angaben hierzu ein Strombedarf wie für die Aufbereitung der Polyolefine angesetzt, der jedoch aufgrund der zur Trennung von HIPS und ABS erforderlichen elektrostatischen Separation um 10 kWh/t erhöht worden ist. Für die Aufbereitung von EPS wird gemäß [Dehoust et al. 2016] ein Strombedarf von 833 kWh/t angenommen. Für die Aufbereitung von Folien ist in Kapitel 2.2.4 eine Spanne von 400-1100 kWh/t angegeben. Der untere Wert wird für die Erzeugung von Rezyklatqualitäten übernommen, die für den Einsatz in Holz-/ Betonersatz-Produkten geeignet sind, der obere Wert dagegen für die Aufbereitung von Folien in Richtung hochwertiges Rezyklat zum Ersatz von Primärkunststoffen.

Die Optimierung der Aufbereitung von Kunststofffraktionen kann potenziell durch eine Kombination aus den beiden Verfahren Laser- und Flakesortierung nach Farbe sowie Windsichtung zur verbesserten Separation erfolgen. Der damit verbundene höhere Aufwand wird über einen angesetzten Stromaufschlag von 2 kWh/t bezogen auf den gesamten Inputstrom berücksichtigt, der für alle Fraktionen angenommen wird. Bei Einsatz der Friktionsreinigung zur Folienaufbereitung erhöht sich der Strom-

bedarf um weitere 105 kWh/t, was im optimierten Szenario für die Folienfraktionen angesetzt ist. Die Anwendung von Heißwäsche und Friktionsreinigung im Bereich des PET-Recyclings benötigt im Mittel zusätzlich 258 kWh/t, die ebenso für den optimierten Fall angesetzt sind. Darüber hinaus wird für den optimierten Fall der Einsatz von Waschchemikalien für alle zu waschenden Fraktionen (alle außer EPS und Mischkunststoffe für Beton-/Holzersatzanwendungen) angenommen, in einer Menge von 50 % Natronlauge 5 kg/t, 50 % Waschverstärker 2,2 kg/t, 50 % Entschäumer 1,1 kg/t und 50 % Schwefelsäure 1 kg/t. Für die technischen Kunststoffe ist im optimierten Fall zusätzlich eine Flotation angesetzt, für die der Einsatz von 1 kg/t Soda angenommen wird.

Der mit den optimierten Aufbereitungsprozessen verbundene Erfolg lässt sich folgendermaßen beziffern: Die Rezyklatausbeute von 96,9 % wird dann auch für PET angenommen. Für die Rezyklate aller Fraktionen ist angesetzt, dass sie dann zu 100 % im Bereich Substitution primärer Kunststoffe und nicht mehr in einfachen Kunststoffprodukten (bspw. Pallisaden) zum Ersatz von Holz oder Beton eingesetzt werden. Zusätzlich wird von größeren Substitutionsfaktoren ausgegangen, wie in Kapitel 4.2.3 aufgeführt.

Aufbereitung der Schredder-Leichtfraktion (Elektro-/Elektronikaltgeräte und Altfahrzeuge)

Bei der Aufbereitung von Kunststoffen aus Elektro-/Elektronikaltgeräten (EAG) beträgt die Ausbeute aufgrund der Ausschleusung unerwünschter bromierter Flammschutzmittel und PVC nur 55 % [Köhnlechner et al. 2012]. Daher wird für alle Kunststoffsorten aus Altfahrzeugen und EAG eine Rezyklatausbeute ohne Störstoffe von nur 65 % bezüglich der Trockensubstanz anstatt 96,9 % wie für die anderen Kunststoffsorten bzw. -fraktionen angenommen. Der Rest wird energetisch verwertet. Es wird im Stand der Technik davon ausgegangen, dass nur die Hauptkunststoffsorten ABS, HIPS, PE und PP werkstofflich aufbereitet werden, wobei unterstellt wird, dass für 10 % dieser Fraktionen analog zu den anderen Abfallfraktionen nur eine Verwertung in Richtung einfacher Kunststoffprodukte (Substitution von Beton und Holz) möglich ist. Für PA und PVC wird im Stand der Technik ohne Optimierung demnach von einer energetischen Verwertung ausgegangen.

Der Strom- und Wasserbedarf wird stets auf den gesamten Input angerechnet, der in die Aufbereitung geht. In Ermangelung von Daten sind für die technischen Kunststoffe die gleichen Bedarfe wie für die Aufbereitung der Polyolefine angesetzt. Aufgrund der vollständigen Überführung der Kunststoffe über die Schredderleichtfraktion in ein Kunststoffkonzentrat wird mehr gemischtes Kunststoffmaterial in die Aufbereitung verbracht, so dass sich dadurch absolut ein entsprechend höherer Strombedarf als bei der Aufbereitung von vorsortierten Kunststoffsorten ergibt. Hinzu kommt der zusätzliche Strombedarf in Höhe von 10 kWh/t für die elektrostatische Separation der hier betrachteten Kunststoffe, bei denen eine Sortierung über NIR-Technik oder Schwimm-Sink-Trennung aufgrund sehr geringer Dichteunterschiede oder rußbasierter Schwarzfärbung nicht möglich ist (vgl. Kapitel 2.2.4.6).

Auch für die Schredder-Leichtfraktion lässt sich ein Optimierungspotenzial annehmen. Verbunden mit dieser Optimierung lassen sich dann angenommen zusätzlich PA und PVC aus den Altfahrzeugen und EAG werkstofflich verwerten, einheitlich mit einer Rezyklatausbeute von 65 %, auch hier bezogen auf die Trockensubstanz ohne Störstoffe, wohingegen im Stand der Technik davon nur für die Hauptkunststoffsorten ausgegangen wird. Den Rezyklaten wird dann zu 100 % der Einsatz im Bereich Substitution primärer Kunststoffe und nicht mehr in einfachen Kunststoffprodukten (bspw. Pallisaden) mit Substitution von Holz oder Beton unterstellt. Es wird angenommen, dass sich im Zuge der Optimierung die Substitutionsfaktoren für den Ersatz von Primärkunststoffen wie in Kapitel 4.2.3 dargestellt vergrößern.

Der Aufwand für diese Optimierung wird zum einen über den zusätzlichen Strombedarf für eine Kombination aus den beiden Verfahren Laser- und Flakesortierung und Windsichtung von zusammen 2 kWh/t bezogen auf den gesamten Inputstrom abgeschätzt. Zusätzlich wird eine Flotation mit einem Strombedarf von 10 kWh/t angenommen, für die aber insgesamt kein zusätzlicher Strombedarf veran-

schlägt wird. Es werden pauschal 10 kWh/t an weiterem Strombedarf bezogen auf den gesamten Inputstrom für eine Optimierung im Bereich der Sortierung über bspw. weitere Detektoren angesetzt. Auch hier wird für den optimierten Fall der Einsatz von Waschchemikalien analog der Aufbereitung der anderen Kunststoff-Sortierfraktionen (s. oben) unterstellt. Darüber hinaus ist für die angenommene Flotation ein Sodabedarf von 1 kg/t angesetzt.

Aufbereitung der Sortierfraktion Mischkunststoffe (aus Leichtverpackungen)

Die Mischkunststoffe werden mit unterschiedlichen Verwertungszielen aufbereitet. Im Stand der Technik werden 63 % zu EBS bzw. zur energetischen Verwertung in Zementwerken aufbereitet, wofür nach [Dehoust et al. 2016] ein Strombedarf von 320 kWh/t angelastet wird. Es verbleiben demnach 37 %, die werkstofflich verwertet werden (errechnet aus [Dehoust & Christiani 2012]). Dies gelingt danach weiterhin für 19 % in einer Form, die die Herstellung einfacher Produkte ermöglicht, die ansonsten aus Holz oder Beton hergestellt würden. Einschlägig ist die Parkbank oder die Palisade. Dies bedeutet, dass für 18 % eine Aufbereitung durchgeführt wird, die auch für diese Sortierfraktion die Herstellung hochwertiger Kunststoff-Regranulate ermöglicht.

Mit diesem Aufwand sind Erfolge verbunden. So gelingt es, für die einfachen Produkte eine Rezykeltausbeute von schätzungsweise 96,9 % ohne Störstoffe bezogen auf die Trockensubstanz zu erzielen. Werden die Mischkunststoffe zu hochwertigen Kunststoff-Regranulaten aufbereitet, liegen die Ausbeuten niedriger. Diese Aufbereitung ist nach dem Stand der Technik angenommen nur für die Polyolefine (PE und PP) möglich, wobei bezogen wieder auf die Trockensubstanz ohne Störstoffe eine Ausbeute von 70 % angenommen wird. Diese Ausbeute wird nicht nur für formstabile Kunststoffe, sondern angenommen auch für Folien erzielt. Für alle weiteren Kunststoffe, die in den 18 % zur Aufbereitung Richtung hochwertige Kunststoff-Rezyklate enthalten sind, verbleibt im Stand der Technik – wie auch für die Aufbereitungsreste – nur die energetische Verwertung.

Auch für Mischkunststoffe ist eine Optimierung in der Aufbereitung möglich, indem wie für die oben beschriebene Aufbereitung der Kunststoff-Sortierfraktionen mittels einer Kombination aus den beiden Verfahren Laser- und Flakesortierung nach Farbe sowie Windsichtung eine verbesserte Separation erzielt wird sowie teilweise Waschchemikalien eingesetzt werden (s. unten). Diese Optimierung bedeutet, dass sich der Anteil, der zu einer Herstellung von Ersatzbrennstoff für den Einsatz in Zementwerken aufbereitet wird, auf angenommen 50 % begrenzen lässt. Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass sich ebenfalls 50 % werkstofflich verwerten lassen. Die Optimierung bedeutet zudem, dass der Verwertungsweg zur Herstellung von hochwertigen Regranulaten gestärkt werden kann. Angesetzt ist, dass dann 20 % des Materials zu einfachen Kunststoffprodukten verarbeitet werden (Substitution von Holz und Beton), 30 % zu hochwertigen Regranulaten und hier nicht nur für die Polyolefine, sondern für sämtliche Kunststoffsorten mit einer Ausbeute von 70 % ohne Störstoffe bezogen auf die Trockensubstanz.

Diese Erfolge sind, wie auch schon oben zur Aufbereitung der Kunststoff-Sortierfraktionen beschrieben, mit einem höheren Aufwand verbunden. Der Stromeinsatz für den gesamten werkstofflich aufbereiteten Anteil erhöht sich angenommen um 2 kWh/t. Zur Herstellung der hochwertigen Granulate wird zudem für diese Teilfraktion (30 %) der Einsatz von Waschchemikalien analog zur Aufbereitung der Kunststoff-Sortierfraktionen (s. oben) angesetzt.

Die Optimierung der Verwertung von Kunststoffen aus den Leichtverpackungen zielt in der Sortierung auf eine Steigerung der Ausbeuten der Kunststoffsorten. Diese Steigerung erfolgt auch „zu Lasten“ der Fraktion Mischkunststoffe und hat hier auch Auswirkungen auf deren Zusammensetzung und Eigenschaften. Die mit der Optimierung der Verwertung der Mischkunststoffe angesetzte Steigerung der werkstofflichen Verwertung ist daher optimistisch, da dies trotz der eher geringeren Verwertungsseignung postuliert wird.

4.2.3 Erzielter Nutzen in Form von Substitutionserfolgen

Sämtliche Anteile, die sich über die Sortierung und Aufbereitung nicht werkstofflich verwerten lassen, werden energetisch als Brennstoff in Zementwerken genutzt. Hier wird eine Substitution von Steinkohle angenommen und zwar zu 100%.

Der Substitutionserfolg ergibt sich aus den eingesparten Lasten, die mit der konventionellen Herstellung nutzengleicher Produkte auf Basis von Primärrohstoffen verbunden wäre.

Die Regranulate aus der Aufbereitung erreichen nicht ganz die Qualitäten und Spezifikationen der Granulate, die auf Basis primärer Rohstoffe hergestellt werden. Der Substitutionsfaktor ist daher insbesondere im Stand der Technik nicht 1:1. Folgende Faktoren sind angesetzt:

- Stand der Technik
 - = Kunststoffsorten aus vorsortierten Fraktionen und Schredder-Leichtfraktion 0,8
 - = bei Folien als Ausgangsmaterial 0,7
 - = bei Mischkunststoffen als Ausgangsmaterial 0,6
- Optimiert, wie in Kapitel 4.2.1 und 4.2.2 dargestellt (in der Aufbereitung Kombination aus den beiden Verfahren Laser- und Flakesortierung nach Farbe sowie Windsichtung, Waschchemikalien, Friktionsreinigung, Flotation)
 - = Kunststoffsorten einheitlich, inklusive Folien 0,9
 - = bei Mischkunststoffen als Ausgangsmaterial 0,7

Auf die Frage der zukünftigen Energiebereitstellung wurde in Kapitel 4.1.3 bereits ausführlicher eingegangen. Die nachfolgende Erläuterung soll sich auf die Prozesse beschränken, denen in der nachfolgenden Bilanzierung eine größere Bedeutung zukommt.

Einsatz als Ersatzbrennstoff (EBS) in der Zementindustrie

Aktuell werden etwa 60 % des Energiebedarfs von Zementwerken (Feuerungswärmeleistung) über Sekundärbrennstoffe gedeckt, wobei technisch bedingt und in Abhängigkeit von der Rohstoffversorgung die Anteile von Zementwerk zu Zementwerk sehr unterschiedlich sind. Der Anteil an Sekundärbrennstoffen wird in Zukunft eher weiter ansteigen. Primärbrennstoff wird weiterhin Kohle bleiben, eine Umstellung auf Erdgas wird eher nicht oder nicht in großem Stil erfolgen.

Der Einsatz von Sekundärbrennstoffen wird auch in dieser Studie im Sinne eines Marginalansatzes in Konkurrenz zu Primärbrennstoff diskutiert. Die aus den Sortierresten oder Aufbereitungsresten produzierten Ersatzbrennstoffe ersetzen in der Ökobilanz demnach zu 100 % Kohle. Die damit verbundenen Substitutionserfolge sind demnach für den Verwertungsweg energetische Verwertung hinsichtlich der substituierten Umweltwirkungen maximal angesetzt.

Produktion von Kunststoffen

Die Herstellung von Kunststoffen und deren Weiterverarbeitung zu den einzelnen Produkten wurde im Rahmen des Projektes nicht gesondert bilanziert und berechnet.

Dies unterstellt vereinfachend, dass sich die Kunststoffe aus Regranulat analog verarbeiten lassen wie Primärkunststoffe und in der Herstellung der verschiedenen Produkte aus Kunststoff keine Anpassungen in den Produktionsabläufen notwendig sind.

Um die Umweltlasten der verschiedenen Kunststoffe abbilden zu können, wurden die Daten und Informationen herangezogen, die der Wirtschaftsverband Plastics Europe über die entsprechenden Ökoprofile zur Verfügung stellt. Ausgewertet wurden die Profile für PE [Plastics Europe, 2016a], PP [Plastics Europe, 2016b], PVC [Plastics Europe, 2015] und PET [CPME, 2017]. Die Datensätze repräsentieren eine nahezu aktuelle Situation. Nur das Modul für Polyamide (PA) ist etwas älter und stammt aus dem Jahr 2005. Diese Datensätze lassen sich vereinfachend auch in etwa auf die Zukunft fort-

schreiben, auch wenn hier die eingesetzte elektrische Energie mit einem anderen Energieträgermix zur Verfügung gestellt werden wird. Die Umweltlasten (hier explizit CO₂-Äq.) aus der Herstellung von PET resultieren jedoch nur zu 7,5 %, bei PE zu 10-20 %, PP zu knapp 15 % und PVC zu knapp 30 % aus dem Strombezug. Entsprechende Anpassungen der Datensätze waren im Rahmen des Projektes nicht möglich. Bei der Bewertung der Bilanzierungsergebnisse aus der Ökobilanz ist dies zu berücksichtigen.

4.3 Steigerung des Kunststoffrecyclings aus ökologischer Sicht - Bilanzierungsergebnisse

4.3.1 Darstellungsweise

Die Ergebnisdarstellung besteht für jedes Szenario aus drei Balken, welche die folgenden Elemente darstellen (von links nach rechts):

- Sektorale Ergebnisse der Lasten des Aufbereitungsprozesses – positive Staffebalken (Systemlasten)
- Gutschriften für Sekundärprodukte, die das System verlassen (vermiedene Lasten für Primärmaterialherstellung) – negative Staffebalken (Gutschriften)
- Nettoergebnisse: Gesamtumweltlast abzüglich der Gutschriften – grauer Balken Netto-Ergebnis

Auf Lastenseite werden folgende Sektoren betrachtet:

- Sortierung: Energiebedarf für den Sortierprozess bzw. die Post-Schredder-Verfahren bei den Fraktionen Altfahrzeuge und Elektroaltgeräte (EAG)
- Stoffliche Aufbereitung: Energie- und Betriebsmittelbedarf für die Aufbereitung der Kunststoffe, die Richtung Ziel-Kunststoffsorte sortiert wurden sowie der Schredderleichtfraktion aus Altfahrzeugen und EAG
- Mischkunststoff (MKS)-Aufbereitung: Energie- und Betriebsmittelbedarf für die EBS- und werkstoffliche Aufbereitung der MKS-Fraktion aus der LVP-Sortierung und energetische Verwertung des nicht werkstofflichen Teils in Zementwerken
- Sortierreste energetisch: energetische Verwertung der nicht Richtung werkstoffliche Aufbereitung aussortierten Kunststoffe in Müllverbrennungsanlagen (MVAs) und Zementwerken
- Aufbereitungsreste energetisch: energetische Verwertung der bei der Aufbereitung anfallenden Reste in Zementwerken und MVAs

Auf Gutschriftenseite ist folgende Unterteilung getroffen:

- Gutschrift (GS) Werkstoffe: Vermiedene Produktionslasten der substituierten Primärkunststoffgranulate bzw. Holz- und Betonprodukte; Herstellungslasten wie heute angesetzt
- GS Strom: in MVAs produzierter Strom, der den deutschen Strommix im Jahr 2030 substituiert
- GS Wärme: in MVAs produzierte Wärme, die Wärme aus Erdgaskesseln substituiert
- GS Zementwerk: Substitution von Steinkohle durch Verbrennung (Marginalansatz)

Alle Indikatorergebnisse beziehen sich auf die Aufbereitung von 1000 kg Kunststoffabfällen (funktionelle Einheit). Transporte zum Abnehmer werden weder im Falle der Aufbereitung noch der substituierten Primärmaterialien berücksichtigt. Neben den Stand der Technik ist für jede Abfallfraktion jeweils das optimierte Szenario gestellt „opt“.

4.3.2 Diskussion entlang der Wirkungskategorien und Summenparameter

Treibhauseffekt

In den beiden folgenden Abbildungen sind die Ergebnisse zum Treibhauseffekt dargestellt, in erster Abbildung für gemischten Bauabfall, Gewerbeabfall, Sperrmüll und LVP, in zweiter Abbildung zur Verwertung der Schredder-Leichtfraktion aus E-Schrott und Altfahrzeugen.

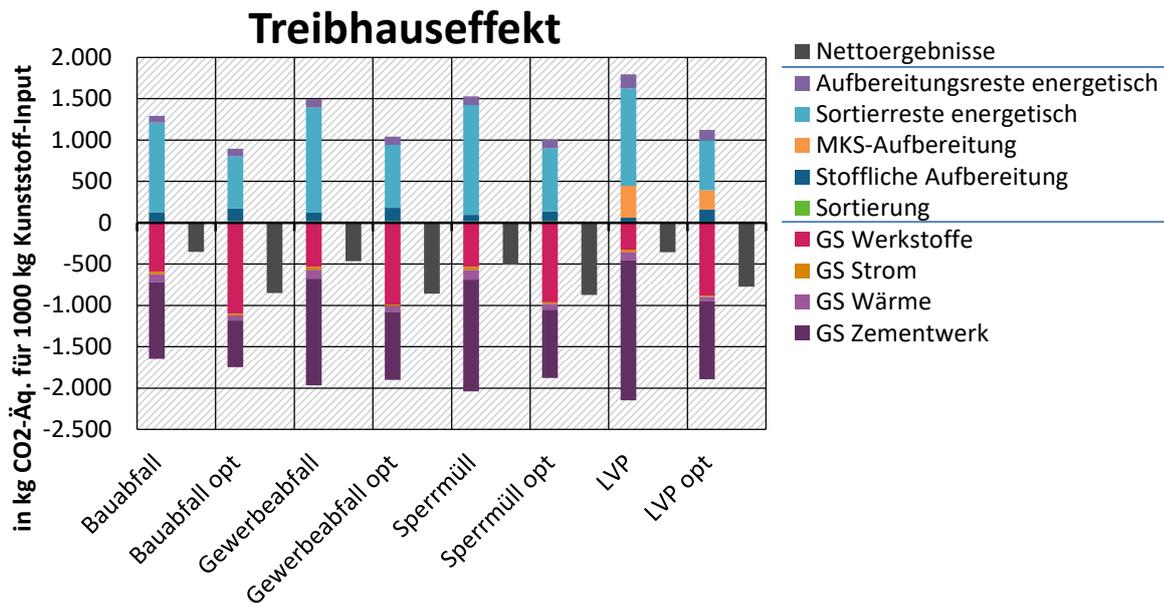
Betrachtet man zunächst die Lasten, fällt die große Bedeutung der Umweltlasten ins Auge, die mit der energetischen Verwertung oder thermischen Beseitigung von Behandlungsrückständen, aber auch der Sortierreste verbunden sind. Sie sind deutlich höher als diejenigen, die aus dem Energie- und Betriebsmitteleinsatz für die eigentlichen Aufbereitungsprozesse zur werkstofflichen Verwertung resultieren. Im Zuge der Verbrennung der Kunststoffe in MVAs und Zementwerken wird Kohlendioxid aus fossilen Quellen (erdölbasierte Kunststoffe) emittiert. Auch der größere Anteil an Umweltlasten bei der Aufbereitung von Mischkunststoffen aus der Verwertung der Leichtverpackungen ist darauf zurückzuführen. Sie werden zu einem großen Teil zu EBS aufbereitet und in Zementwerken verbrannt. Die Lasten verändern sich im Zuge aller Optimierungen. Der höhere Aufwand für die Sortierung und Aufbereitung wird deutlich, ist aber auch aufgrund des angesetzten Energiemixes im Jahr 2030 begrenzt. Da aber gleichzeitig deutlich weniger Massen einer energetischen Nutzung zugeführt werden, weil mit der Optimierung vor allem eine Steigerung des werkstofflichen Anteils verbunden ist, liegen die daraus resultierenden Lasten deutlich niedriger. „In Summe“ bedeutet dies deutlich geringere Lasten aus den Verwertungssystemen.

Werden die Ersatzbrennstoffe in Zementwerken eingesetzt und substituieren dort den Einsatz von Steinkohle, ist die energetische Verwertung auch mit entsprechend hohen Substitutionserfolgen verbunden. Die daraus resultierenden Gutschriften sind bei allen Abfallströmen deutlich. Ihre Bedeutung nimmt parallel zur Mengenverschiebung durch die Optimierung der Verwertung ab. Diese Mengenverschiebung in Richtung werkstoffliche Verwertung zeichnet sich ebenfalls deutlich in den Gutschriften für die Substitution von Primärrohstoffen ab. Die hierfür errechneten Werte verdoppeln sich oft nahezu. Die Gutschrift für die Energiebereitstellung in Zementwerken ist aufgrund des auch zukünftig angesetzten Marginalansatzes, nach welchem dort Steinkohle substituiert wird, als maximale Abschätzung anzusehen.

„In Summe“ sind die Optimierungen zumeist mit einer kleinen Schmälerung der Substitutionserfolge und Gutschriften verbunden, der Effekt der verringerten Substitution von Kohle in Zementwerken überwiegt den des Anstiegs in der Kunststoffsubstitution etwas.

Die Netto-Ergebnisse zeigen über alle Abfallfraktionen hinweg durch die Optimierung hingegen eine deutliche Verbesserung der Bewertungsergebnisse, weil die Verlagerung von der energetischen Verwertung u.a. in Zementwerken in Richtung Kunststoffsubstitution in Summe aus deutlich geringeren Lasten und nur etwas geringeren Gutschriften deutliche Reduktionen beim Treibhauseffekt ermöglicht. Netto erzielt die energetische Verwertung der Kunststoffe in den Zementwerken keine Entlastung, die stoffliche Verwertung zu hochwertigen Rezyklaten hingegen schon. Die Netto-Entlastungen verdoppeln sich durch die Optimierung daher teilweise.

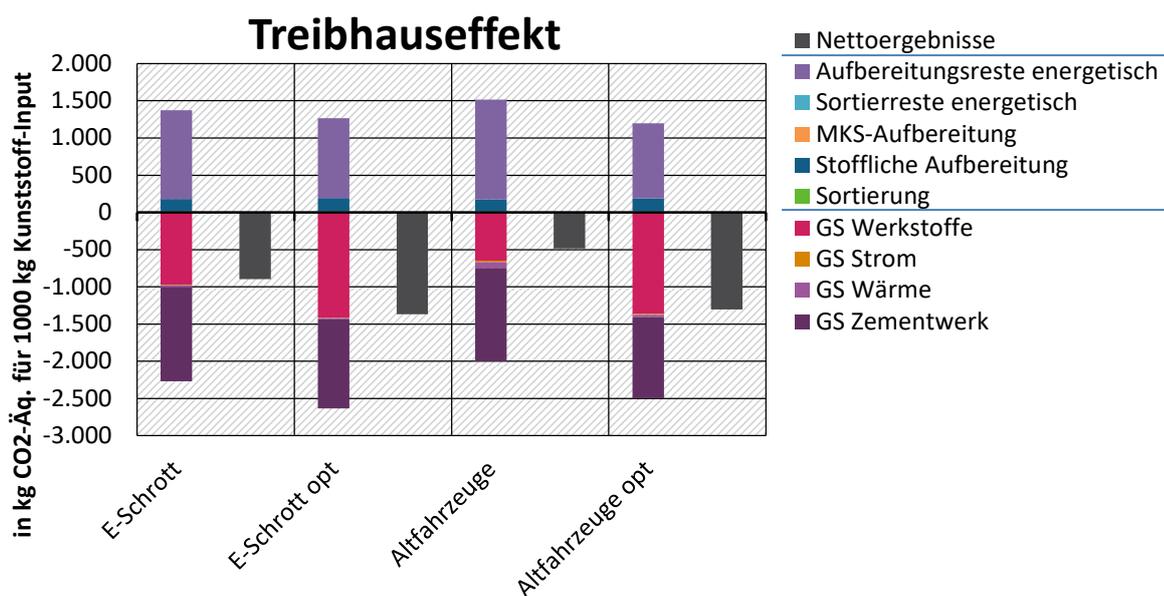
Abbildung 31: Die Verwertung von Kunststoffen unter dem Aspekt Treibhauseffekt



Über die werkstoffliche Verwertung von technischen Kunststoffsorten und v.a. PA aus den Abfallfraktionen Elektroaltgeräte und Altfahrzeuge können Primärkunststoffe mit sehr hohen spezifischen Herstellungslasten substituiert werden, so dass über die Optimierung größere Einsparungen erzielt werden können. „Netto“ sind die mit der Optimierung verbundenen Erfolge größer als diejenigen, die aus den anderen Abfallfraktionen erzielt werden können.

Dies relativiert sich mengenmäßig aber wieder, da die Kunststoffabfallmengen aus dem Bereich der Elektro/Elektronik und Fahrzeuge jeweils nur 5 % der gesamten Kunststoffabfälle ausmachen.

Abbildung 32: Die Verwertung von Schredder-Leichtfraktionen unter dem Aspekt Treibhauseffekt



Terrestrische Eutrophierung

Beim terrestrischen Eutrophierungspotenzial fallen die Lasten durch die energetische Verwertung deutlich geringer aus als beim Treibhauseffekt, da die Stickoxid (NOx)-Emissionen durch die Rauchgasreinigung im Gegensatz zum Kohlendioxid reduziert werden. Daher dominieren hier die Lasten für die Aufbereitung im Falle der Optimierung und dies aber auf niedrigem Niveau. Umgekehrt ist mit der Substitution von Primärkunststoffen eine deutlich größere Gutschrift verbunden als mit der Einsparung von Energie aus Steinkohle in Zementwerken.

Die Optimierung und der damit verbundene größere Aufbereitungsaufwand führt demzufolge zu geringfügig höheren Lasten und gleichzeitig, im Gegensatz zum Treibhauseffekt, zu einer deutlichen Erhöhung der Gutschriften und damit, wie wiederum auch beim Treibhauseffekt, zu einer deutlichen Erhöhung der Netto-Einsparungen.

Dies gilt sowohl für die Verwertung der Kunststoffe in den klassischen Abfallfraktionen als auch auf höherem Erfolgsniveau für die Verwertung der Schredder-Leichtfraktionen.

Abbildung 33: Die Verwertung von Kunststoffen unter dem Aspekt terrestrische Eutrophierung

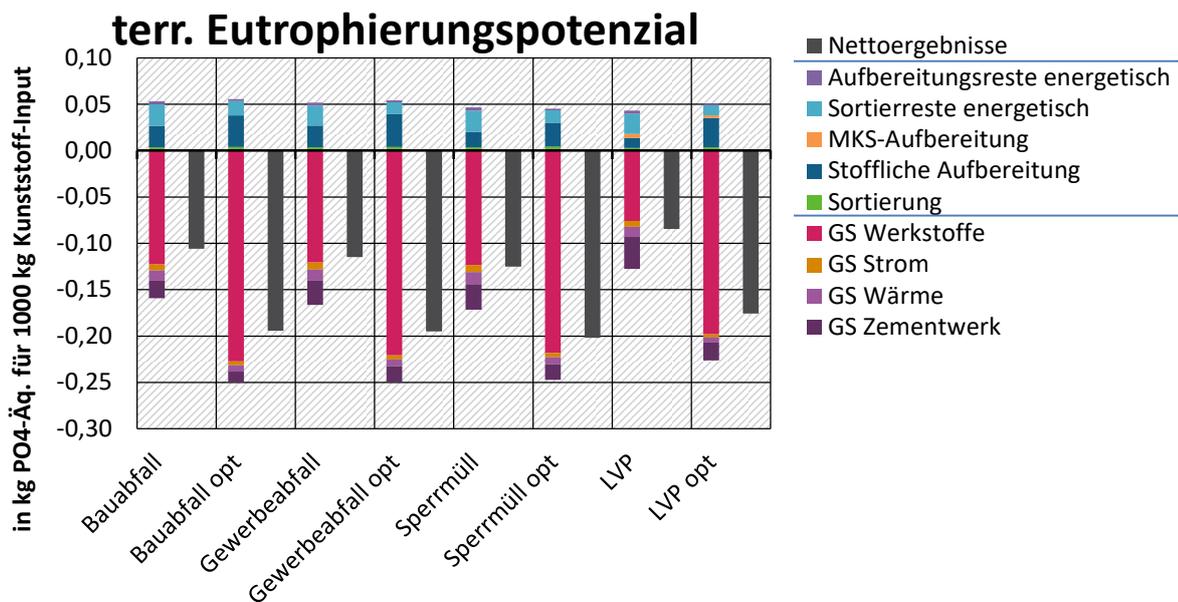
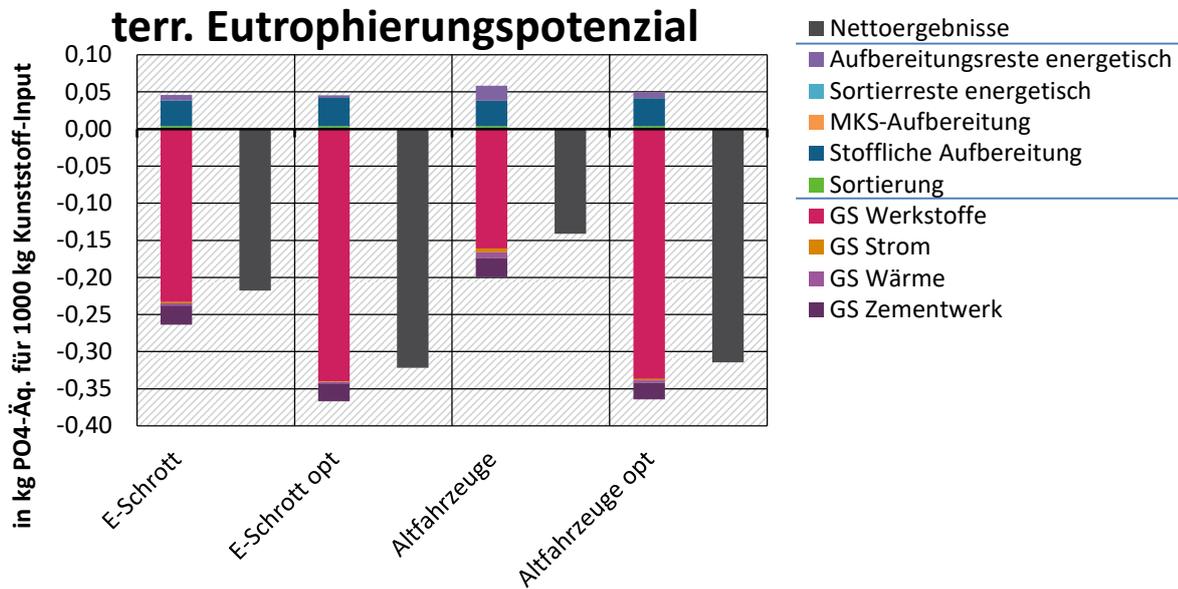
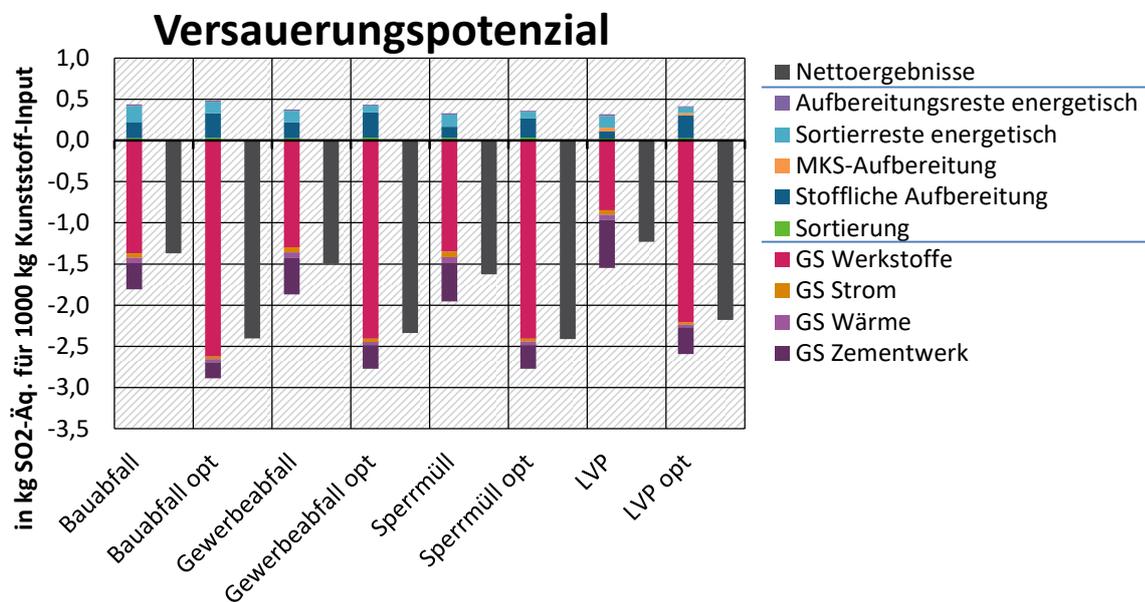


Abbildung 34: Die Verwertung von Shredder-Leichtfraktionen unter dem Aspekt terrestrische Eutrophierung



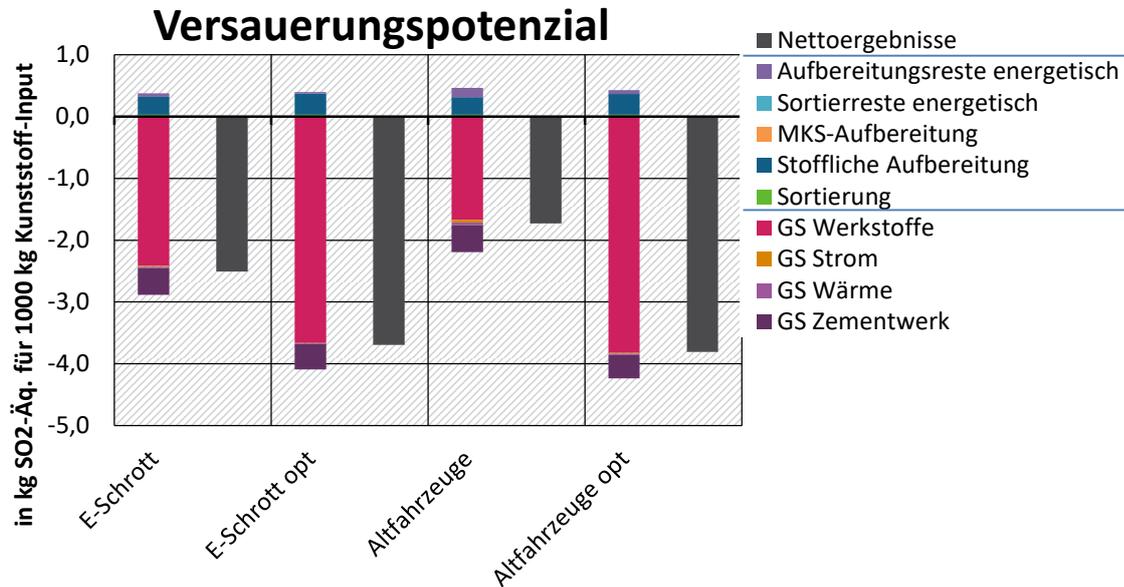
Versauerungspotenzial

Abbildung 35: Die Verwertung von Kunststoffen unter dem Aspekt Versauerungspotenzial



Das Bild des Versauerungspotenzials ähnelt dem des terrestrischen Eutrophierungspotenzials, weil dieses neben den Schwefeldioxid (SO₂)-Emissionen ebenso von den NO_x-Emissionen bestimmt wird. Die Lasten der energetischen Verwertung fallen relativ etwas geringer aus, da Kunststoffe kein schwefelhaltiger Brennstoff sind, wohingegen die Gutschriften im Zementwerk größer ausfallen, weil hier mit Steinkohle ein schwefelhaltiger Brennstoff eingespart wird.

Abbildung 36: Die Verwertung von Schredder-Leichtfraktionen unter dem Aspekt Versauerungspotenzial



Gesundheitsrisiken durch Feinstaub

Auch das Feinstaubpotenzial zeichnet ein ähnliches Bild. NO_x- und SO₂-Emissionen sind auch hier neben Partikeln die wesentlichen Treiber. Das Potenzial wird über die direkten Emissionen von Partikeln mit einem Durchmesser von <2,5 µm sowie solchen aus emittierten Vorläufersubstanzen wie NO_x, SO₂, Ammoniak oder flüchtigen organischen Verbindungen ohne Methan (NMVOC) gebildeten Partikeln verursacht. Die Lasten aus der Sortierung und Aufbereitung sind ggf. unterschätzt, weil in Ermangelung von Daten hierzu keine direkten Staubemissionen aus diesen Prozessschritten berücksichtigt sind.

Abbildung 37: Die Verwertung von Kunststoffen unter dem Aspekt Feinstaubrisikopotenzial (PM 2,5)

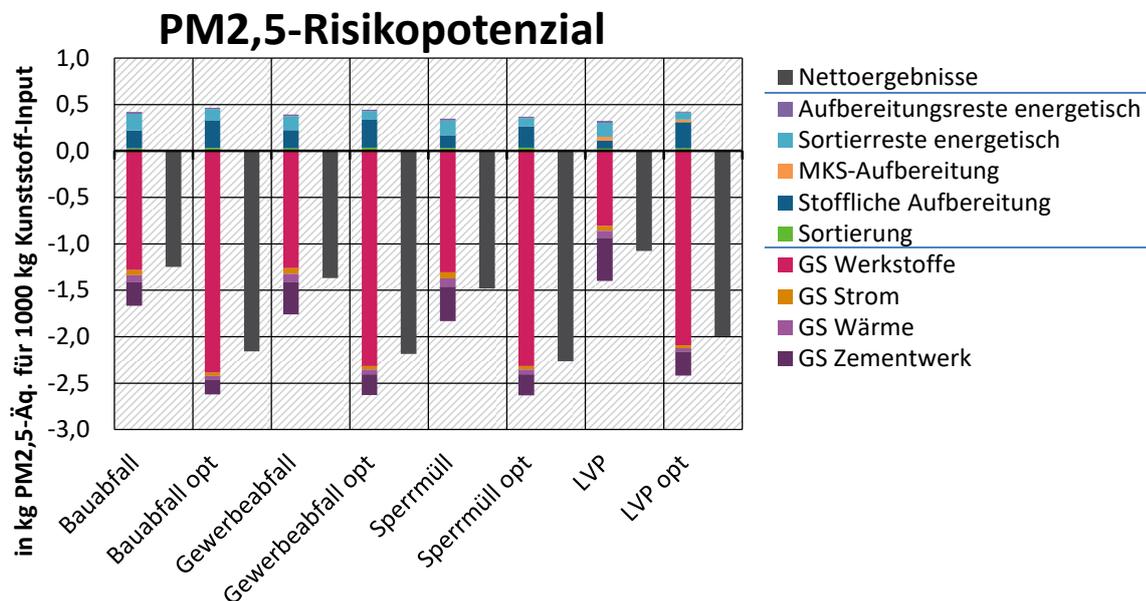
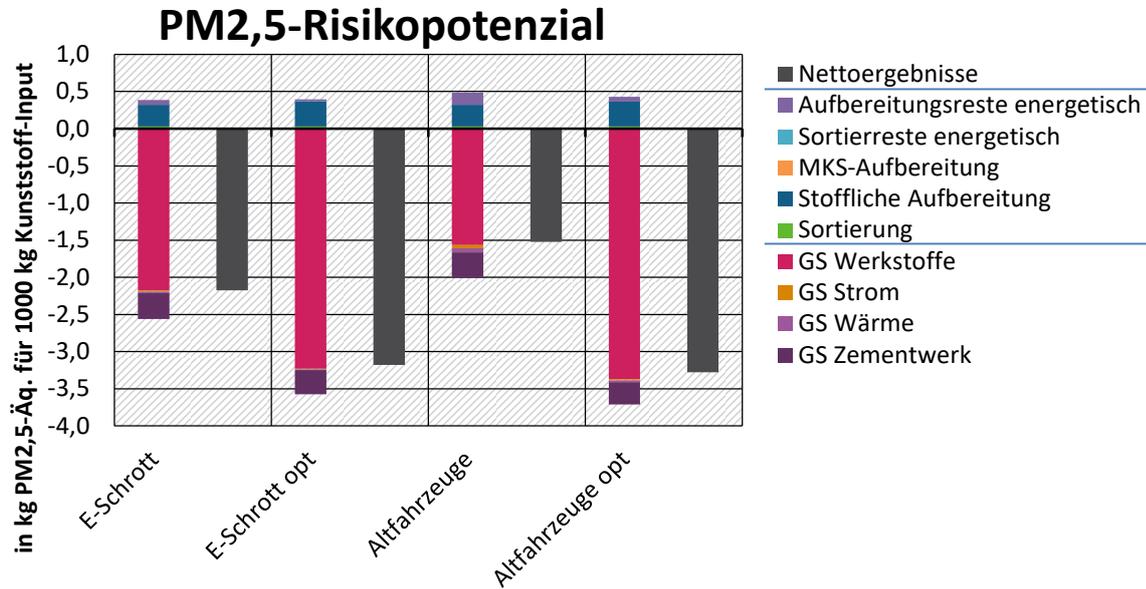


Abbildung 38: Die Verwertung von Schredder-Leichtfraktionen unter dem Aspekt Feinstaubrisikopotenzial (PM 2,5)



Krebsrisikopotenzial

Auch im Krebsrisikopotenzial zeigt sich keine andere Situation. Wesentlicher Treiber in der Gutschrift für die Substitution von Primärkunststoffen sind hier die Vermeidung von Luftemissionen von Nickel, Benzol, Arsen und Benzo(a)pyren, die als Emissionen in der Primärproduktion auftreten. Im Unterschied zu den oben betrachteten Wirkungskategorien können über die optimierte Verwertung der Kunststoffe aus Elektroaltgeräten und Altfahrzeugen hier keine größeren Entlastungen erzielt werden als für diejenigen aus den anderen Abfallfraktionen. Die Substitution von Steinkohlefeuerung im Zementwerk führt ebenso zur Einsparung von Nickel-Emissionen, die insbesondere im Zuge der Steinkohlevorkette auftreten.

Abbildung 39: Die Verwertung von Kunststoffen unter dem Aspekt Krebsrisikopotenzial

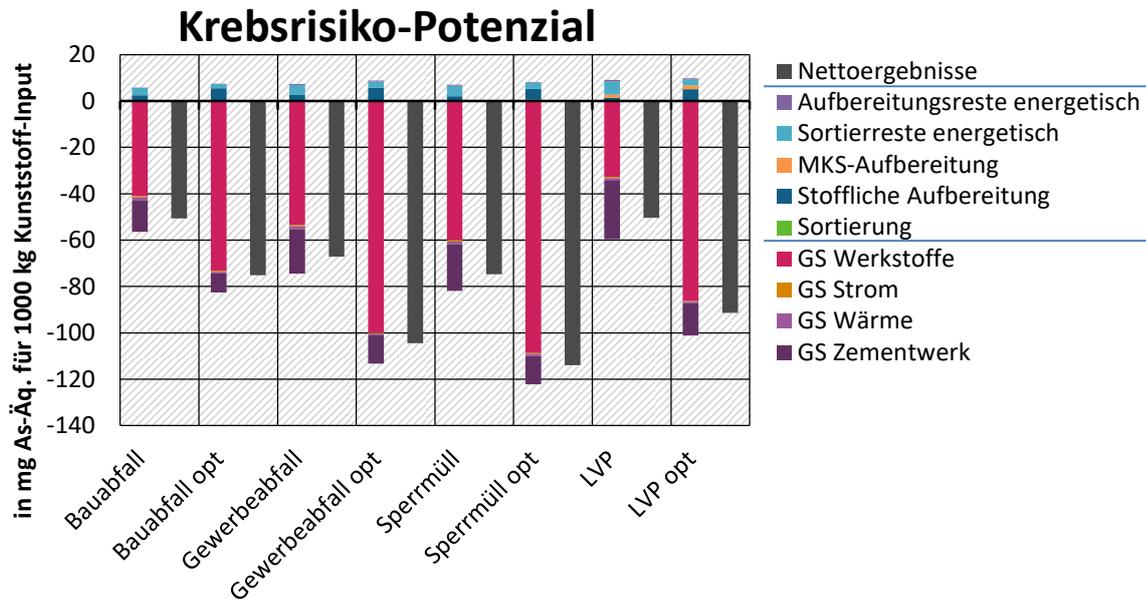
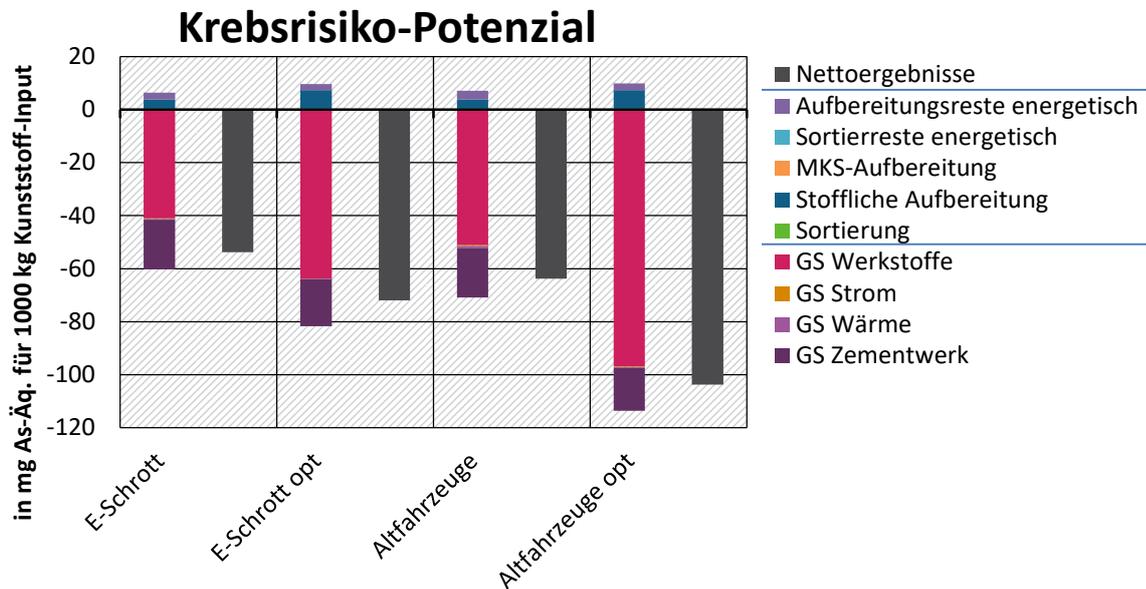


Abbildung 40: Die Verwertung von Schredder-Leichtfraktionen unter dem Aspekt Krebsrisikopotenzial



Beanspruchung fossiler Ressourcen

Der fossile kumulierte Energieaufwand summiert die fossile Energie, die in den stofflich und energetisch genutzten Materialien des Systems stecken, auf. Mit der Optimierung ist ein klein wenig mehr Energie für die Aufbereitung nötig. Dadurch werden aber deutlich höhere Gutschriften über die Substitution von Primärkunststoffen erschlossen, weil Kunststoffe viel fossile Energie beinhalten. Auch die alternative Verbrennung der Kunststoffabfälle im Zementwerk führt zu einer Einsparung des fossilen Primärenergieträgers Steinkohle. Großteils sind die Gutschriften für die Substitution von Pri-

märk Kunststoffen aber auch bereits in den Szenarien ohne Optimierung (und damit nicht voller Ausschöpfung des Potenzials zur Kunststoffsubstitution) größer als diejenigen für die energetische Verwertung im Zementwerk und fallen damit bedeutender als beim Treibhauseffekt aus. Das Kohlenstoff-/Energieverhältnis der Steinkohle muss entsprechend größer sein als das der Kunststoffe und neben der in den substituierten Kunststoffen gespeicherten Energie kommt auch noch der Energieeinsatz in der Kunststoffproduktion hinzu. Anders als beim Treibhauseffekt führt die Optimierung für alle Abfallfraktionen daher zu einer deutlichen Steigerung der Gutschriften in Summe. Die Lasten ändern sich mit der Optimierung vergleichsweise kaum, weil die Aufbereitung einen vergleichsweise geringen Bedarf an Energie aus fossilen Energieträgern hat.

Die vergleichsweise geringen Gutschriften für Kunststoffe aus Bauabfällen erklären sich mit dem großen Anteil an PVC, das aufgrund seines gegenüber Polyolefinen deutlich geringeren Heizwertes einen geringeren Energiegehalt besitzt.

Abbildung 41: Die Verwertung von Kunststoffen unter dem Aspekt KEA (fos)

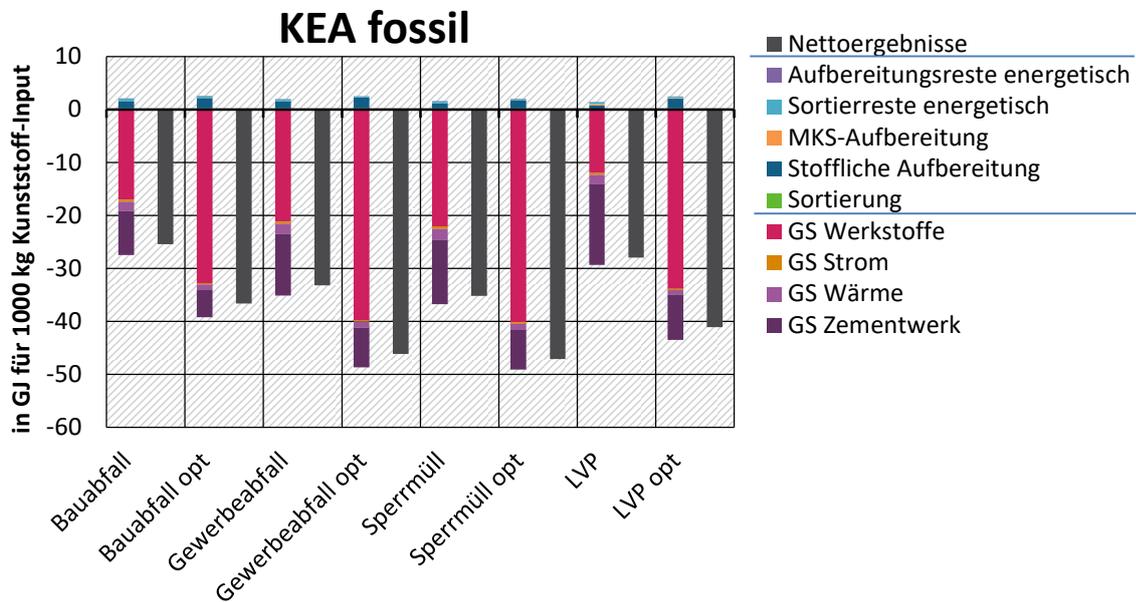
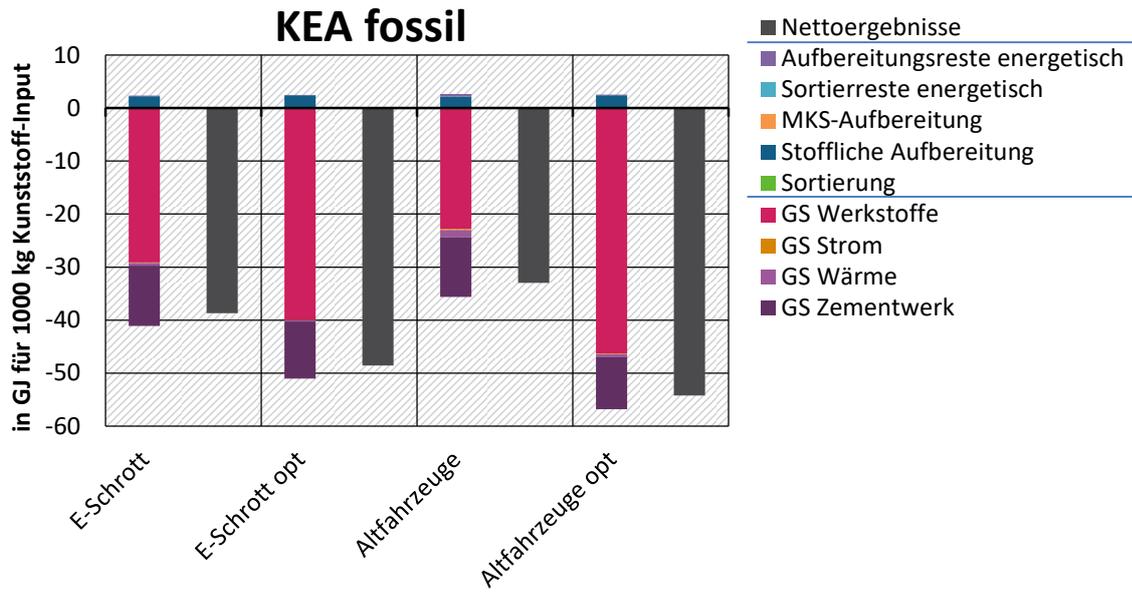


Abbildung 42: Die Verwertung von Schredder-Leichtfraktionen unter dem Aspekt KEA (fos)



Aquatische Eutrophierung

Beim aquatischen Eutrophierungspotenzial zeigt sich in den Lasten die Bereitstellung der Wasserchemikalien für die optimierte Aufbereitung. Die mit dem Abwasser verbundenen Lasten werden hingegen eher unterschätzt, weil angenommen wird, dass von den Wasserchemikalien im Abwasser kein eutrophierender Beitrag ausgeht. Als Einsparung sind die mit der Produktion von Primärkunststoffen inkl. Vorketten verbundenen eutrophierenden Emissionen ins Wasser sichtbar, wohingegen die Substitution von Strom und Wärme sowie Steinkohle inklusive Feuerung in Zementwerken kaum Wasseremissionen einspart.

Abbildung 43: Die Verwertung von Kunststoffen unter dem Aspekt aquatische Eutrophierung

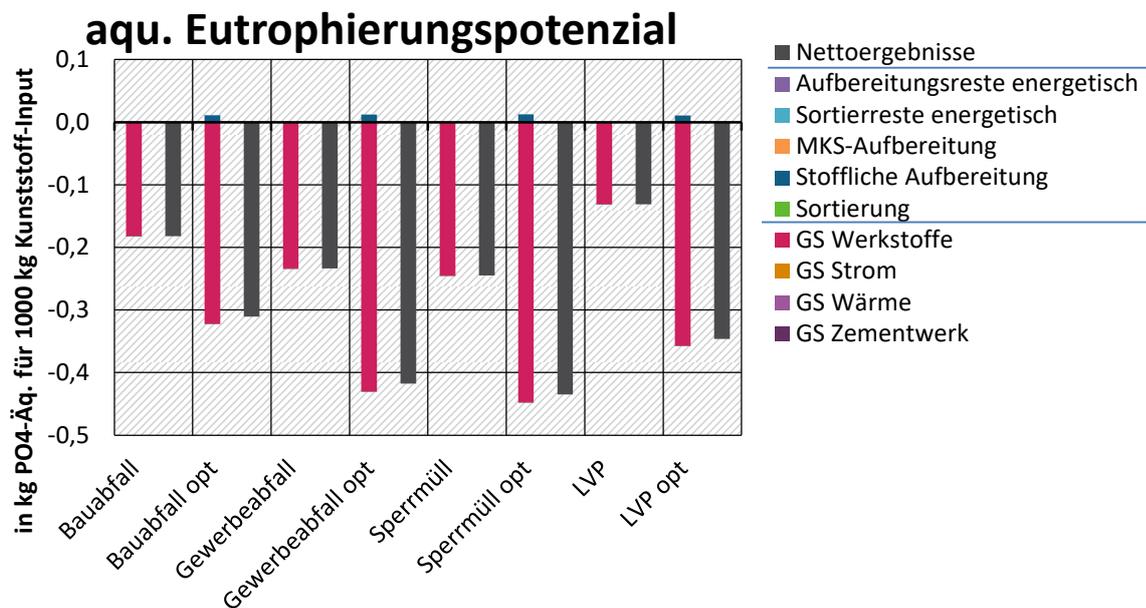
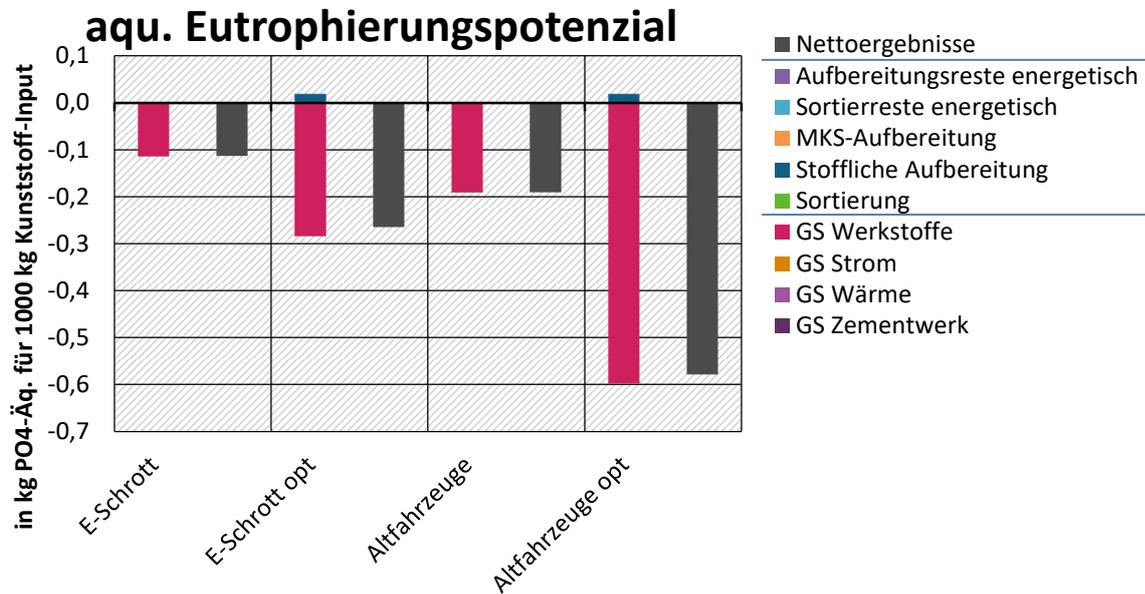


Abbildung 44: Die Verwertung von Schredder-Leichtfraktionen unter dem Aspekt aquatische Eutrophierung



4.4 Festlegung von Kriterien für die Bewertung von innovativen Techniken und technischen Verfahrensschritten

Wie man aus den Ausführungen in Kapitel 4.3 deutlich erkennen kann, lässt sich unter der Randbedingung eines zukünftigen Energiemixes und damit deutlich höheren Anteilen erneuerbarer Energien zur Bereitstellung von Strom festhalten, dass grundsätzlich alle Innovationen in Techniken und Systemen, die gegenüber dem Stand der Technik höhere Ausbeuten in Richtung werkstofflicher Verwertung versprechen, vorteilhaft sind. Dies gilt für alle diskutierten Abfallfraktionen und über alle Umweltwirkungskategorien hinweg. Der damit verbundene Mehraufwand hinsichtlich Energie- und Betriebsmitteleinsatz ist in allen Fällen durch den erhöhten Substitutionserfolg mehr als gerechtfertigt. Die werkstoffliche Verwertung ist gegenüber einer energetischen Verwertung grundsätzlich vorteilhaft. Die vergleichsweise hohen Gutschriften für die Verwendung als Ersatzbrennstoff in Zementwerken beschränkt sich im Wesentlichen auf den Aspekt Treibhauseffekt und unterstellt einen auch zukünftig gleichbleibend hohen spezifischen Energieeinsatz, der zudem klassisch durch Stein- oder Braunkohle gedeckt würde, ein Maximalszenario.

Sollen einzelne technische Innovationen oder auch innovative Systemlösungen aus Umweltsicht bewertet werden, ist hierfür das entscheidende Kriterium eine damit verbundene Steigerung der Ausbeuten und hier sowohl in der Sortierung als auch in der Aufbereitung. Wie aus Tabelle 18 entnommen werden kann, werden diese Erfolge mehr oder minder alleine über einen höheren Energieaufwand erkaufte, deren Bereitstellung in Zukunft mit deutlich geringeren Umweltlasten verbunden sein wird. Alle Innovationen sind daher grundsätzlich positiv, die höhere Ausbeuten (möglichst geringe Anteile in Richtung energetische Verwertung) und Reinheiten (möglichst gute Einsatzmöglichkeiten der Rezyklate mit entsprechend hohen Substitutionserfolgen) versprechen. Ein damit verbundener Mehraufwand ist aus Umweltsicht dabei tendenziell immer gerechtfertigt.

Dies bedeutet allerdings nicht, dass auch technische Innovationen aus Umweltsicht wichtig sind, die einen geringeren Energie- und Betriebsmitteleinsatz bei gleichem Sortier- und Aufbereitungserfolg versprechen.

5 Fazit

Mit der vorliegenden Studie soll insbesondere das für Deutschland bestehende technische Potenzial für eine Steigerung des Kunststoffrecyclings und des Rezyklateinsatzes identifiziert werden. Hierzu zählen Sortierprozesse, Prozesse der Kunststoffaufbereitung sowie nicht zuletzt der Einsatz der Rezyklate selbst. Die Optimierung des Kunststoffrecyclings und damit die Erhöhung der werkstofflich hochwertig verwerteten Anteile an Kunststoffabfällen ist kein Selbstzweck. Die Optimierung zielt auf eine möglichst deutliche Umweltentlastung. Aufwand und Nutzen müssen demnach in einem guten Verhältnis zueinander stehen.

Wie im Rahmen der Studie deutlich wurde: Die derzeit bestehenden technischen Möglichkeiten werden in Deutschland nicht in vollem Umfang ausgeschöpft. Die in der Praxis zum Kunststoffrecycling eingesetzten Techniken und Prozesse weichen teilweise deutlich vom Stand der Technik ab.

Schon zur Beschreibung und Bewertung des Standes der Technik liegen demnach nicht immer Daten und Informationen aus der Verwertungspraxis vor. Die mit möglichen technischen Innovationen verbundenen Folgen ließen sich nur qualitativ beschreiben. Zukünftige Änderungen in der Abfallzusammensetzung, die sich aus der Weiterentwicklung von Kunststoffprodukten auch im Materialmix oder der Umstellung der Sammelsysteme ergeben können und Auswirkungen auf das Kunststoffrecycling haben, wurden gemäß der Aufgabenstellung der Studie nicht berücksichtigt.

Mit den Ergebnissen aus dieser Studie lassen sich demnach Möglichkeiten und Trends aufzeigen. Im Einzelnen und im Detail sind Bewertungen und Schlussfolgerungen mit entsprechenden Unsicherheiten verbunden.

Mit der verfügbaren Technik gelingt bereits ein hochwertiges Recycling. Es besteht jedoch vielfach eine erhebliche Diskrepanz zwischen dem Stand der Technik und dem Stand der Praxis. Darüber hinaus konnten zahlreiche technische Ansätze identifiziert werden, die insbesondere auf eine Verbesserung der Qualität der Rezyklate abzielen, da diesbezüglich teilweise noch relevante Hemmnisse für deren Einsatz in Neuprodukten bestehen. Diese technischen Optimierungspotenziale adressieren dabei sowohl die Sortierung und Aufbereitung der Altkunststoffe als den Rezyklateinsatz.

Wie aus den Ergebnissen der vergleichenden Bewertung des Stands der Technik mit den im Rahmen des Projektes aufgezeigten Optimierungspotenzialen und -ansätzen deutlich wird, ist die postulierte Steigerung der werkstofflichen Verwertung von Kunststoffabfällen aus ökologischer Sicht sehr sinnvoll. Dies gilt für alle betrachteten Abfallmassenströme. Die Ergebnisse sind in ihrer Aussage über alle diskutierten Umweltwirkungskategorien gleichgerichtet. Die umweltpolitische Zielsetzung der verstärkten werkstofflichen Verwertung wird durch die Ergebnisse der Ökobilanzen gestärkt. Hierbei ist insbesondere die Verwertung mit der Zielrichtung Kunststoffgranulat gemeint. Der Nutzen und damit die erzielbaren Substitutionserfolge für die Herstellung von Agglomeraten, die zur Produktion einfacher dickwandiger Kunststoffprodukte wie z.B. der Parkbank genutzt werden können, sind deutlich geringer.

Es muss bedacht werden, dass die in der Ökobilanz postulierten hohen Substitutionsfaktoren auch damit zusammenhängen, dass Rezyklate bislang oftmals in Anwendungen mit geringeren Ansprüchen eingesetzt werden. In der Ökobilanzierung findet eine Pauschalisierung des Kunststoffrecyclings statt, obwohl dieses sehr individuell ist und nur schwer verallgemeinert werden kann. Eine kunststoff- und produktübergreifende Ökobilanzierung kann nicht alle Effekte abbilden. Dennoch lassen sich die o.g. und folgenden tendenziellen Aussagen ableiten.

Die Untersuchung technischer Potenziale hat ergeben, dass eine den Einsatz steigernde Verbesserung der Rezyklatqualität mit der zur Verfügung stehenden Technik zu Lasten der Quantität geht und insbesondere durch den Einsatz zusätzlicher Aggregate mit einem erhöhtem Energie-, Wasser- und ggf. Betriebsmittelverbrauch verbunden ist.

Wie man aus der Gegenüberstellung von Aufwand und Nutzen aber jeweils ersehen kann, ist selbst ein erheblich gesteigerter Aufwand in der Sortierung, Aufbereitung und Verwertung immer dann gerechtfertigt, wenn mit diesem ein größerer Nutzen verbunden werden kann. Angesichts der zukünftig umweltfreundlicheren Produktion und Bereitstellung von elektrischer Energie aus überwiegend erneuerbaren Quellen, ist dieser Mehraufwand gerade auch dann gerechtfertigt, wenn wie im Falle der Kunststoffe ein Produkt (Kunststoffprimärgranulat) substituiert werden kann, dessen Herstellung mit deutlichen Umweltlasten verbunden ist. Die Optimierung von werkstofflichen Verwertungssystemen macht daher vor allem dann Sinn, wenn diese auf das jeweilige ganze Verwertungssystem wirkt und den mit der Verwertung intendierten Nutzen erhöht.

Dies bedeutet nicht, dass man auch für einzelne Verfahrensschritte, Anlagen, Techniken nicht grundsätzlich immer auch eine Optimierung im Sinne einer Steigerung der Effizienz anstreben sollte. Den spezifischen Aufwand an Energie und Betriebsmitteln und die Emissionen bei gleichbleibendem Nutzen d.h. Aufbereitungserfolg zu senken, ist nicht nur aus ökologischer Sicht immer sinnvoll.

Schon heute und damit im Status Quo wäre in vielen Fällen die Technik vorhanden, die Kreislaufwirtschaft von Kunststoffabfällen deutlich zu erhöhen. Es fehlt auch nicht an einem mangelnden Entwicklungsstand der einzelnen Techniken und Verfahren. Sie sind meist – andernorts – auch großmaßstäblich ausreichend erprobt, um sie im Entsorgungsbetrieb einsetzen zu können.

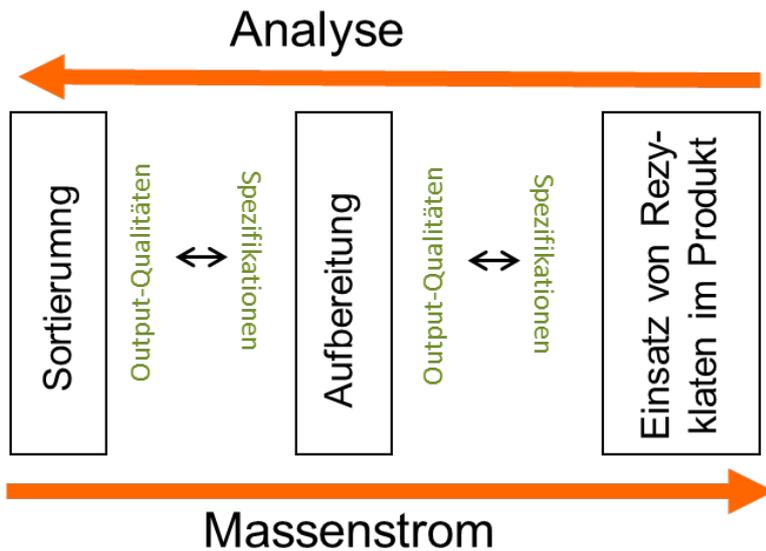
Ansatzpunkte zur Optimierung der Kreislaufwirtschaft für Kunststoffabfälle sind neben der Hebung technischer Potenziale deshalb weiterhin hier zu suchen:

- ▶ Bisher fehlt teilweise die Bereitschaft der Hersteller von Kunststoffprodukten, bei der Herstellung zumindest in Anteilen auf sekundäre Rohstoffe im Sinne der Rezyklate zurückzugreifen. Es gibt keine objektive Notwendigkeit in der Industrie, sich mit dieser Frage ernsthaft zu beschäftigen oder sich gar über die Möglichkeiten und Rahmenbedingungen zu informieren.
- ▶ Dies gilt noch weit mehr für die Frage des Produktdesigns. Das Design eines Produktes / einer Verpackung muss auf zahlreiche Anforderungen und Zielsetzungen ausgelegt werden. Die (umweltpolitischen) Rahmenbedingungen sind so gesetzt, dass eine recyclinggerechte Gestaltung des Produktes einen nur sehr geringen Stellenwert hat, wenn dieser Aspekt überhaupt in der Produktentwicklung eine Rolle spielt.
- ▶ Das System der Verwertung (Aufbereitung und Einsatz der Rezyklate) muss sich in seiner Ausrichtung und Philosophie deutlich umstellen. Vor dieser Herausforderung stehen nicht nur die Entsorger von Kunststoffabfällen, sondern alle Abfallbranchen. Die Abfallverwertung muss sich quasi entgegen der Entsorgungsrichtung der Abfallmassenströme (siehe Grafik) auf die Erfordernisse der Industrie, in diesem Falle die Kunststoff verarbeitende Industrie, ausrichten. Letztendlich gilt es, hochwertige sekundäre Rohstoffe zu produzieren, die möglichst weit den Eigenschaften der klassischen in der Produktion eingesetzten primären Rohstoffe entsprechen sollten, so dass weder an der Produktion noch an den Produkteigenschaften Änderungen vorgenommen werden müssen. Der Hersteller entscheidet sich, einen Anteil seiner Rohstoffe aus der Kreislaufwirtschaft zu beziehen, da diese seine Spezifikationen erfüllen. Dies ist im direkten Austausch zwischen Aufbereiter, der Regranulate herstellt, und Produzent und damit für den Einzelfall zu erreichen. Für den Aufbereiter bedeutet dies im zweiten Schritt, dass er seine Prozesse auf dieses Produktionsziel ausrichten muss. Dies bedeutet damit eine Optimierung der Technik, aber auch eine Definition der Zusammensetzung und Eigenschaften der Materialien, die er zur Aufbereitung übernimmt. Damit sind die Spezifikationen beschrieben, die gegenüber dem vorgelagerten Akteur, dem Sortierer kommuniziert werden müssen. Es müssen in Abhängigkeit der technischen Möglichkeiten Spezifikationen definiert werden, die

die Lieferanten für die Anlieferung von Sortierfraktionen einhalten müssen, um die Verwertungserfolg nicht zu gefährden.

- ▶ Trotzdem lassen sich Vermischungsschäden auch innerhalb derselben Kunststoffsorten durch zueinander nicht kompatible Unterarten, Additive und Füllstoffe nie vermeiden, so dass der Einsatzbereich von Kunststoffrezyklaten in der Praxis auch an Grenzen stößt.

Abbildung 45: Verwertungssystem in einer ambitionierten Kreislaufwirtschaft



Quelle: Eigene Darstellung, © ifeu

- ▶ Damit wird aber auch deutlich, dass die entscheidende Weichenstellung in der Verbesserung der Qualitäten der Abfallmassen liegt, die den Input in das System der Verwertung der Kunststoffabfälle darstellen. Die technischen Möglichkeiten sind beschränkt, weitere Innovationen in der Sortier- und Aufbereitungstechnik schwierig umzusetzen. Die entscheidenden Weichenstellungen zur Optimierung der Verwertungserfolge liegen in einem Produktdesign für die Vielzahl an Kunststoffprodukten, das deutlich stärker an deren Recyclingfähigkeit ausgerichtet ist sowie in Sammelsystemen, die die Bereitstellung dieser Abfallmassen mit deutlich geringeren Querverschmutzungen und Fehlwurfanteilen ermöglichen. Beide Aspekte waren nicht Gegenstand der Untersuchungen.
- ▶ Die Produzenten sind aber nicht nur in der Frage eines geeigneten Produktdesigns in Richtung Recyclingfähigkeit gefragt. In vielen Fällen fehlt seitens der Produzenten zugleich die Bereitschaft, in der Produktion zumindest in Anteilen auf sekundäre Rohstoffe und damit Rezyklate zurückzugreifen. Dies ist nicht nur eine Frage des technisch möglichen, sondern auch grundsätzlich fehlender Akzeptanz geschuldet. Gelingt es, wie oben aufgezeigt, die Verwertungssysteme „von hinten her“ und damit von der Sicherstellung der Spezifikation und notwendigen Qualitäten für die Rezyklate her aufzubauen, dürften für diese Akzeptanzprobleme auch die letzten materiellen Voraussetzungen entzogen sein.

6 Quellenverzeichnis

- Abts, G. (2016): Kunststoff-Wissen für Einsteiger. Carl Hanser Verlag. 3., aktualisierte und erweiterte Auflage. München
- Affüpper, M. (2016): Ressourcenkreislauf Elektroaltgeräte. in: Der Metallhandel. Das VDM Magazin für Handel, Recycling und Produktion. Ausgabe III/2016. S. 4 ff. Verband Deutscher Metallhändler e. V. Berlin
- AgPR (2015): Arbeitsgemeinschaft PVC-Bodenbelag Recycling: Prozess. <http://www.agpr.de/cms/website.php?id=/de/recycling-prozess.htm&nid=1&nidsub=3>. aufgerufen am 03.05.2017
- Aliaga, C.; Ferreira, B.; Hortal, M.; Pancorbo, M.; López, J. M.; Navas, F. J. (2011): Influence of RFID tags on recyclability of plastic packaging, *Waste Management* 31 (2011) 1133–1138
- Al-Salem, S.M.; Lettieri, P.; Baeyens, J. (2009): Recycling and recovery routes of plastic solid waste (PSW): A review, *Waste Management* 29 2625–2643
- Aral (2010): Aral Aktiengesellschaft: Dieselmotoren - Anforderungen, Qualität, Perspektiven. Forschung und Technik. Broschüre
- Ashton, E. G.; Kindlein Jr., W.; Demori, R.; Cândido, L. H. A.; Mauler, R. (2016): Recycling polymeric multi-material products through micronization, *Journal of Cleaner Production* 116 268-278
- Attenberger, Peter; Hohenadel, Robert; Kufner, Thomas; Mieden, Oliver; Winter, Andreas (2011): Polyvinylchlorid Trendbericht. In *Kunststoffe* Ausgabe 10/2011. Carl Hanser Verlag. München
- Azeem Unnisa, Syeda; Hassanpour, Malek (2017): Development circumstances of four recycling industries (used motor oil, acidic sludge, plastic wastes and blown bitumen) in the world, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 72 605–624
- Bauer, M.; Lehner, M.; Schwabl, D.; Flachberger, H.; Kranzinger, L.; Pomberger, R.; Hofer, W. (2017): Bestandsaufnahme und mögliche Perspektiven der nass-mechanischen Aufbereitung von Altkunststoffen für das rohstoffliche Recycling. Veröffentlicht in der Zeitschrift: Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft. Ausgabe 11-12/2017
- BDSV (2012): Bundesvereinigung Deutscher Stahlrecycling- und Entsorgungsunternehmen e.V. - BVT Merkblatt BREF für Großschredderanlagen – Standpunkt der deutschen Schredderwirtschaft
- Beel, H. (2017): Sortierung von schwarzen Kunststoffen nach ihrer Polymerklasse mit Hyperspectral-Imaging-Technologie. in *Recycling und Rohstoffe* Band 10. TK Verlag - Fachverlag für Kreislaufwirtschaft
- Bendel, Hanna (2015): Kunststoffabfälle sortieren: Höhere Reinheit bei niedrigeren Kosten
<http://www.plastverarbeiter.de/53589/kunststoffabfaelle-sortieren-hoehere-reinheit-bei-niedrigeren-kosten/>
- Bonten, C. (2014): Kunststofftechnik. Einführung und Grundlagen. Carl Hanser Verlag. München
- Braun, Dietrich (2002): Recycling of PVC, *Prog. Polym. Sci.* 27 2171–2195
- Brunn, Michael (2017): Die Roboter kommen langsam. In *Recycling Almanach 2017*. Hrsg. ATEC Business Information GmbH. München
- Brunner, S.; Fomin, P.; Kargel, Ch. (2015): Automated sorting of polymer flakes: Fluorescence labeling and development of a measurement system prototype, *Waste Management* 38 49–60
- Bünemann, A.; Christiani, J.; Rachut, G. u.a. (2011): Planspiel zur Fortentwicklung der Verpackungsverordnung. Teilvorhaben 1: Bestimmung der Idealzusammensetzung der Wertstofftonne. UBA-Texte 8/2011, Dessau-Roßlau
- bvse (2015): Pressemitteilung: Klasse und Masse für das Kunststoffrecycling!.
http://events.bvse.de/sites/default/files/events/pm/151019_klasse_und_masse.pdf. aufgerufen am 26.04.2017
- Consultic 2016: Produktion, Verarbeitung und Verwertung von Kunststoffen in Deutschland 2015 – Langfassung
- CPME PET Manufacturers in Europe (2017): Polyethylene Terephthalate (PET, Bottle Grade), June 2017
- Cyclos-htp (2017): Prüfung und Testierung der Recyclingfähigkeit. Fassung 3.5. http://cyclos-htp.de/fileadmin/user_upload/Anforderungs-_und_Bewertungskatalog_Version_3.5_Stand_03.08.2017.pdf. aufgerufen am 27.11.2017
- Dangel, R. (2017): Spritzgießwerkzeuge für Einsteiger. Carl Hanser Verlag. 2., aktualisierte Auflage. München

- Dehne, I.; Kanthak, M.; Oetjen-Dehne, R. (2011): Aufkommen, Verbleib und Ressourcenrelevanz von Gewerbeabfällen; UBA-Texte 19/2011; Dessau
- Dehne, I.; Oetjen-Dehne, R.; Siegmund, N.; Dehoust, G.; Möck, A. (2015): Stoffstromorientierte Lösungsansätze für eine hochwertige Verwertung von gemischten gewerblichen Siedlungsabfällen. UBA-Texte 18/2015. Dessau-Roßlau
- Dehoust, G.; Christiani, J. (2012): Analyse und Fortentwicklung der Verwertungsquoten für Wertstoffe Sammel- und Verwertungsquoten für Verpackungen und stoffgleiche Nicht-verpackungen als Lenkungsinstrument zur Ressourcenschonung. UBA-Texte 40/2012. Dessau-Roßlau
- Dehoust, G.; Möck, A.; Merz, C.; Gebhardt, P. (2016): Umweltpotenziale der getrennten Erfassung und des Recyclings von Wertstoffen im Dualen System. Öko-Institut. Berlin. https://www.gruener-punkt.de/fileadmin/layout/redaktion/Nachhaltigkeit/Studie-Oeko-Institut/16-09-21_OEko-Institut_Abschlussbericht_LCA-DSD.PDF. aufgerufen am 22.06.2017
- dpa (2015): Deutsche Presse Agentur: Recycling bei der Automobilproduktion. Wiederverwendung spart nicht nur Geld. Artikel in Tagesspiegel vom 12.07.2015. <http://www.tagesspiegel.de/mobil/recycling-bei-der-automobilproduktion-wiederverwendung-spart-nicht-nur-geld/12044148.html>. aufgerufen am 13.06.2017
- Drekopf (2019): Aufbereitung von Elektro- und Elektronikschrott bei Hennemann Umweltservice - Präzise Stoffabtrennung bei gleichzeitig hohen Durchsatzmengen durch VARISORT Sortiersysteme, <https://www.drekopf.de/aktuelles/detail/aufbereitung-von-elektro-und-elektronikschrott-bei-hennemann-umweltservice>
- Elkamet (2017): Co-Extrusionsverfahren. <http://www.elkamet.com/de/produkte/kunststoffe-fuer-beleuchtung/verfahren/polycarbonatpc101.html>. aufgerufen am 30.06.2017
- Eureka Recycling (ohne Datum): Recycling_Plastic_Co.pdf http://sites.fitnyc.edu/depts/sustainabilityatfit/Recycling_Plastic_Co.pdf aufgerufen am 30.11.2017
- Fleischhacker, Staphanie (2011): Stoffliche Verwertung von Abfällen – Einsatz der Nainfrarot –Sortiertechnik im Bereich von Gewerbeabfällen, Masterarbeit, Institut für nachhaltige Abfallwirtschaft und Entsorgungstechnik Montanuniversität Leoben
- Fraunhofer FHR; Fraunhofer IOSB, Fraunhofer IAIS (2016): blackValue[®] – Sortierung Schwarzer Kunststoffe https://www.blackvalue.de/content/dam/fhr/blackvalue/PDF/20160509_blackValue_Projektblatt_web.pdf abgerufen am 01.12.2017
- Fröhlich, H.; Thiel, S.; Thomé-Kozmiensky, E.; Goldmann, D. (Hrsg.) (2018): Ständiger Wandel bei der Elektroaltgeräte-Aufbereitung, in Recycling und Rohstoffe, Band 11, Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH, Neuruppin 2018.
- Gesellschaft für Verpackungsmarktforschung GVM (2016): Aufkommen und Verwertung von PET-Getränkeflaschen in Deutschland 2015. Endbericht. Mainz. im Auftrag von Forum PET in der IK Industrievereinigung Kunststoffverpackungen e.V.
- Hahnenkamp, N. J.; Tuminski, R. J. (2017): Untersuchung zur optimierten stofflichen Verwertung von Sperrmüll – insbesondere Matratzen, Teppiche/Teppichböden und Kunststoffe – aus Haushaltungen unter Berücksichtigung der gemeinsamen Behandlung mit gewerblichen Sperrmüllanteilen. oag; gefördert von der DBU.
- Heinen, M.; Rhein, H.-B.; Kurth, P. et al. (Hrsg.) (2018): Elektroaltgeräte, in Praxishandbuch der Kreislauf- und Rohstoffwirtschaft, Kapitel 22, S. 429, Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2018.
- Hoffmann, Harald (2013): Schwieriger Input. In Recycling Magazin. Ausgabe 09/2013. S. 30 ff. Hrsg. ATEC Business Information GmbH. München
- Holzhauser, R. (2015): Altauto-Demontage – Bisherige Entwicklungen und Realität. in Recycling und Rohstoffe. TK Verlag - Fachverlag für Kreislaufwirtschaft
- Hopewell, J.; Dvorak, R.; Kosior, E. (2009): Plastics recycling: challenges and opportunities, hil. Trans. R. Soc. B 364, 2115–2126 doi:10.1098/rstb.2008.0311
- Hopmann, C.; Michaeli, W. (2017): Einführung in die Kunststoffverarbeitung. Carl Hanser Verlag GmbH & Company KG. 8., aktualisierte Auflage. München

- Kauertz, Benedikt; Detzel, Andreas (2017): Verwendung und Recycling von PET in Deutschland Verwendung von PET und PET Rezyklaten aus Verpackungen in Deutschland Eine Kurzstudie im Auftrag des NABU - Naturschutzbund Deutschland e.V. Heidelberg. Oktober 2017
- Kitzberger, C. (2017): Geruchsreduktion hoch zwei Post-Consumer-Rezyklate zur Geruchsverbesserung aufbereiten, in Kunststoffe Ausgabe 6/2017, Carl Hanser Verlag, München
- Köhnlechner, Dr. Rainer (ohne Jahr): Möglichkeiten und Grenzen der Separation und des Recyclings von Kunststoffen aus Elektro- und Elektronikaltgeräten
- Köhnlechner, J.; Jung, H.; Geisler, W.(2012): Kunststoffrecycling – Elektrostatische Trennung separiert auch schwarze Kunststoffe. <https://www.process.vogel.de/kunststoffrecycling-elektrostatische-trennung-separiert-auch-schwarze-kunststoffe-a-386970/index3.html>. aufgerufen im Juni 2018.
- Köhnlechner, R. (2013): Sortenreine Separation schwarzer Kunststoff-Gemische. In Recycling und Rohstoffe. Band 6. Seite 225 -240. TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky
- Köhnlechner, R. (2014): Erzeugung sauberer PS- und ABS-Fractionen aus gemischtem Elektronikschrott. In Recycling und Rohstoffe. Band 7. Seite 379 – 400. TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky http://www.vivis.de/phocadownload/2014_rur/2014_RuR_379_400_Koehnlechner.pdf. aufgerufen am 20.02.2017
- Kozderka, Michal; Rose, Bertrand; Koci, Vladimír; Caillaud, Emmanuel; Bahlouli, Nadia(2016): High impact polypropylene (HIPP) recycling e Mechanical resistance and Lifecycle Assessment (LCA) case study with improved efficiency by preliminary sensitivity analysis, Journal of Cleaner Production 137 1004e1017
- Kranert, M.; Cord-Landwehr, K. (2010): Einführung in die Abfallwirtschaft. Wiesbaden
- Kreibe, S.; Pitschke, Th.; Berkmüller, M.; Förster, A.; Stramm, C.; Pant, A. (2017): Umweltbezogene Bilanzierung von „intelligenten“ und „aktiven“ Verpackungen hinsichtlich Recyclingfähigkeit und Durchführung eines Dialogs mit Akteuren der Entsorgungs- und Herstellungsbranchen, UBA-Texte 22/2017, Dessau-Roßlau 2017
- Kruppa, Dr.-Ing. Stefan (2017): Verbesserte Prozess- und Bauteilqualität beim Einsatz von Rezyklaten. Teil 4 der Serie „Mehr Stabilität beim Spritzgießen mit APC plus“. Erschienen in Kunststoffe 11/2017. Carl Hanser Verlag. München. https://www.kraussmaffe.com/media/files/fachartikel_imm/I-PDF_KraussMaffei_Teil_4_KU_2017_11_.pdf. Zuletzt abgerufen: 28.09.2018
- Kuchta, K. (2017): Thermische Behandlung von Elektro- und Elektronikschrott. In Recycling und Rohstoffe. Band 10. Seite 383 – 390. TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky
- Kunststoffe.de (2016): Schwarze Kunststoffe sortenrein trennen <https://www.kunststoffe.de/fachinformationen/technik-trends/artikel/schwarze-kunststoffe-sortenrein-trennen-1422484.html> abgerufen am 01.12.2017
- LAGA M31B (2018): Mitteilung der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) 31 B. Umsetzung des Elektro- und Elektronikgerätegesetzes Technische Anforderungen an die Behandlung und Verwertung von Elektro- und Elektronikaltgeräten. Stand 18.04.2018
- Langhals, H.; Zgela, D.; Schlücker, T. (2015): Improved High Performance Recycling of Polymers by Means of Bi-Exponential Analysis of Their Fluorescence Lifetimes, Green and Sustainable Chemistry Vol.05 No.02(2015), Article ID:56320,8 pages, http://file.scirp.org/Html/6-5500199_56320.htm
- Lindner, C.; Hoffmann, O. (2015): Analyse/Beschreibung der derzeitigen Situation der stofflichen und energetischen Verwertung von Kunststoffabfällen in Deutschland. http://www.zvo-entsorgung.de/fileadmin/user_upload/zvo-entsorgung/Wissenswertes/ITAD-Consultic-Kunststoffstudie-April-2015.pdf. aufgerufen am 19.06.2017
- LUBW (2011): Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (Hrsg.); Hebisch, R.; Ott, G.; Müller, H.; Peter, L.; Habel, A.: Handlungsanleitung zur guten Arbeitspraxis Kraftfahrzeugrecycling - Tätigkeiten mit Gefahrstoffen beim Recycling von Kraftfahrzeugen.
- Maier, R. D.; Schiller, M.; Pfaender, R. (2016): Handbuch Kunststoff Additive. Carl Hanser Verlag. München
- Martens, H.; Goldmann, D. (2016): Recyclingtechnik, Fachbuch für Lehre und Praxis. Springer Vieweg, Wiesbaden

- Menges, G.; Michaeli, W.; Mohren, P. (2007): Spritzgießwerkzeuge – Auslegung, Bau, Anwendung. Carl Hanser Verlag. 6. Auflage. München
- Meyer, J.; Fey, D.; Krieg, S. (2017): Kunststoff-Sortierung aus Schredderrückständen mit Hochleistungs-Laserspektroskopie. In Recycling und Rohstoffe. Band 10. Seite 193 -198. TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky
- Meyer, J.; Probst, T.; Kirschbaum, S.; Pretz, T.; Julius, J.; Killmann, D.; Kausch, C. (2009): Leitfaden Energieeffizienz für die Recycling-industrie. https://energiertools.ea-nrw.de/_database/_data/datainfopool/Leitfaden_Recycling_DINA4.pdf. aufgerufen am 16.06.2016
- Michaeli, W. (2010): Einführung in die Kunststoffverarbeitung. Carl Hanser Verlag. 6. Auflage. München
- MSV (2012): Mediaservice & Verlag GmbH. Recyclingportal: Schwarze Kunststoffe: Die Lösung eines Problems. <http://www.recyclingportal.eu/artikel/29490.shtml>. aufgerufen am 31.05.2017
- Mudgal, S. et al. (2011): Plastic waste in the environment. Specific contract 07.0307/2009/545281/ ETU/G2 under Framework contract ENV.G.4/FRA/ 2008/0112; BIO Intelligence Service in Zusammenarbeit mit AEA Technology und Institute for European Environmental Policy.
- Näser, K.-H., Peschel G.(1990): Physikalisch chemische Messmethoden, 6. Auflage, Leipzig 1990
- Nickel, W. (1996): Recycling-Handbuch Strategien – Technologien – Produkte. Düsseldorf
- Ott, Gerhard; Vossen, Katja; Hebisch, Ralph; Linsel, Gunter; Brucksch, Erolf; Simon, Sybille; Probst, Thomas (2013): Handlungsanleitung zur guten Arbeitspraxis „Kunststoffverwertung – Tätigkeiten mit Gefahrstoffen und biologischen Arbeitsstoffen bei der werkstofflichen Verwertung von Kunststoffen“. Hrsg. LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg. November 2013
- Peeters, J. R.; Vanegas, P.; Tange, L.; Van Houwelingen, J.; Duflou, J. R. (2014): Closed loop recycling of plastics containing Flame Retardants, Resources, Conservation and Recycling 84 35–43
- Perrin, Didier; Mantaux, Olivier; Lenny, Patrick; Léger, Romain; Dumon, Michel; Lopez-Cuesta; José-Marie (2016): Influence of impurities on the performances of HIPS recycled from Waste Electric and Electronic Equipment (WEEE), Waste Management 56 438–445
- Pfaendner, R. (2016): „Additive für das werkstoffliche Recycling von Kunststoffen“ in: Maier R. D.; Schiller, M. (Hrsg.) Handbuch Kunststoff – Additive, 4., Auflage, München, 2016
- plastverarbeiter (2017): Kunststoff-Schmelzefilter für rPET - Höhere Prozessstabilität trotz stärkerer Verschmutzung, <https://www.plastverarbeiter.de/70762/hoehere-prozessstabilitaet-trotz-staerkerer-verschmutzung/>
- PlasticsEurope (2015): The European Council of Vinyl Manufacturers, Vinyl Chloride (VCM) and Polyvenyl Chloride (PVC)
- PlasticsEurope (2016a): Polypropylene (PP), 2014 update water balance December 2016
- PlasticsEurope (2016b): High-density Polyethylene (HDPE), Low-density Polyethylene (LDPE), Linear Low-density Polyethylene (LLDPE), 2014 update water balance December 2016
- Pioneer project HolyGrail (ohne Datum): HolyGrail: tagging packaging for accurate sorting and high-quality recycling, <http://go.pardot.com/l/110942/2019-05-28/lhts3n>
- Repenning, J.; Emele, L.; Blanck, R.; Böttcher, H.; Dehoust, G.; Förster, H.; Braungardt, S.; Eichhammer, W.; Elsland, R.; Fleiter, T. et al. (2015): Klimaschutzszenario 2050 – 2. Endbericht. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit. Berlin. <https://www.oeko.de/oekodoc/2451/2015-608-de.pdf>. aufgerufen im Juli 2018
- Rewindo (2013): Kunststofffenster-Recycling in Zahlen 2013. http://rewindo.de/rewindo-downloads/downloads/Rewindo_Mengenstromnachweis_2013.pdf. aufgerufen am 07.06.2017
- Rewindo (2016): Kunststofffenster-Recycling in Zahlen 2016. http://www.rewindo.de/rewindo-downloads/downloads/Rewindo_Mengenstromnachweis_2016.pdf. aufgerufen am 05.07.2017
- Sadat-Shojai, Mehdi; Bakhshandeh, Gholam-Reza (2011): Recycling of PVC wastes, Polymer Degradation and Stability 96 404-415
- Sander, K.; Kohlmeyer, R.; Rödiger, L.; Wagner, L. (2017): Altfahrzeuge – Verwertungsquoten 2015 und Hochwertigkeit der Verwertung. in Recycling und Rohstoffe Band 10. TK Verlag - Fachverlag für Kreislaufwirtschaft

- Schade-Dannewitz, S.; Poerschke, J.; Rutz, M.; Barnstedt, D. (2012): Aufbereitung von Leichtfraktionen mit dem Doppeltrommel-Unterdruck-Trenner. in Recycling und Rohstoffe. TK Verlag - Fachverlag für Kreislaufwirtschaft
- Schade-Dannewitz, S.; Poerschke, J.; Rutz, M.; Borowski, C.; Barnstedt, D. (2013): Leichtstoffrecycling mit einem Doppeltrommel-Unterdruck-Trenner. <https://www.ke-next.de/industrie/leichtstoffrecycling-mit-einem-doppeltrommel-unterdruck-trenner-359.html>. aufgerufen am 20.04.2017
- Schellerer, Karl-Martin; Kufner, Thomas; Attenberger, Peter; Riedmiller, Frank; Bahls, Malte; Mieden, Oliver (2017): Polyvinylchlorid (PVC) Fortschrittliche und nachhaltige Eigenschaften für die Bau-, Fahrzeug- und Konsumgüterbranche. In Kunststoffe Ausgabe 10/2017. Carl Hanser Verlag. München
- Schlummer, M. (2009): Kunststoffrückgewinnung aus der Elektroaltgeräte-Demontage. 18. Seminar Kunststoffrecycling in Sachsen 12. Mai. 2009. http://www.hdk-dresden.de/dokumente/kunststoffrecycling_2009/07_Rueckgewinnung.pdf. aufgerufen am 20.02.2017
- Schubert, H. (1986): Aufbereitung fester mineralischer Rohstoffe, Band II – Sortierprozesse, 3. Auflage, Leipzig 1986
- Schunicht, J. (2013): Produkte des E-Schrottrecyclings – Aufbereitungsverfahren, Produktzusammensetzung und verfügbare Mengen, T.R.E.N.D. Hamburg, 5. / 6. Februar 2013
- Shehu, S. Ibrahim (2017): Separation of Plastic Waste from Mixed Waste: Existing and Emerging Sorting Technologies Performance and Possibilities of Increased Rate Finland as Case Study, Masters's Thesis, Lappeenranta University of Technology, School of Energy Systems
- Shent, H.; Pugh, R.J.; Forssberg, E. (1999): A review of plastics waste recycling and the flotation of plastics, Resources, Conservation and Recycling 25 85–109
- Shent, Huiting; Pugh, R.J.; Forssberg, E. (1999): A review of plastics waste recycling and the flotation of plastics, Resources, Conservation and Recycling 25 85–109
- Steger, S.; Ritthoff, M.; Dehoust, G.; Bergmann, T.; Schüler, D.; Kosinska, I.; Burlach, W.; Krause, P.; Oetjen-Dehne, R. (2017): Ressourcenschonung durch eine stoffstromorientierte Sekundärrohstoffwirtschaft (FKZ 3714 93 330 0), Dessau-Roßlau. Noch unveröffentlicht
- Textor, D. (2013): Sekundärrohstoffe im Spannungsfeld Quote – Markt – Qualität – am Beispiel Kunststoff, in 13. Münsteraner Abfallwirtschaftstage – Münsteraner Schriften zur Abfallwirtschaft, Band 15, S. 71 ff., Münster.
- Textor, D. (2015): Impulsvortrag Qualität. Im Rahmen der Mitgliederversammlung des bvse Oktober 2015. http://events.bvse.de/sites/default/files/events/talks/textor_-_impulsvortrag_-_fv_ks.pdf. aufgerufen am 26.04.2017
- Toniolo, Sara; Mazzi, Anna; Niero, Monia; Zuliani, Filippo; Scipioni, Antonio (2013): Comparative LCA to evaluate how much recycling is environmentally favourable for food packaging, Resources, Conservation and Recycling 77 61–68
- u.e.c. Berlin 2011: unveröffentlichtes Datenmaterial der u.e.c. Berlin GmbH
- UBA BMUB (2016): Umweltbundesamt; Bundesministerium für Umwelt (Hrsg): Jahresbericht über die Altfahrzeug-Verwertungsquoten in Deutschland im Jahr 2014. Dessau-Roßlau
- UBA o.J.: Informationssammlung: Best Practice Municipal Waste Management. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/377/dokumente/stoffstrom_altfahrzeuge_car.pdf. aufgerufen am 16.01.2017
- UIP (2017): Umweltinnovationsprogramm. Fördernehmer: REMINE GmbH. Vorhaben: Gewinnung von Primärkunststoffen und Erhöhung der Metallausbeute bei metall- und kunststoffhaltigen Abfällen. Kurzbeschreibung. https://www.umweltinnovationsprogramm.de/sites/default/files/benutzer/784/dokumente/internetbeitrag_remine.pdf. aufgerufen am 07.12.2017
- University of Cambridge (2005): Recycling of Plastics; ImpEE Project, University of Cambridge, <http://www-eng.cam.ac.uk/impee/topics/RecyclePlastics/files/Recycling%20Plastic%20v3%20PDF.pdf>, aufgerufen am 30.11.2017
- Vazquez, Y. V.; Barbosa, S. E. (2016): Recycling of mixed plastic waste from electrical and electronic equipment. Added value by compatibilization, Waste Management 53 196–203

- VDI (2002): VDI Verlag GmbH, Ingenieur.de: PET-Recycling: einfach ätzend. <http://www.ingenieur.de/Themen/Kunststoffe/PET-Recycling-einfach-aetzend>. aufgerufen am 07.06.2017
- VDI 2095 Blatt 3 Entwurf: Richtlinie VDI 2095 Blatt 3. Emissionsminderung - Abfallbehandlung - Anlagen zur Behandlung von Abfallgemischen aus der haushaltsnahen Wertstofffassung und von gemischten Gewerbeabfällen. Richtlinien-Entwurf. Stand Juni 2017
- VEKA (2017): Recycling Impressionen. <http://www.veka-ut.de/index.php?id=51>. aufgerufen am 03.05.2017
- Veolia (2017): CleanPET Produkte. <http://www.veolia.de/cleanpet-produkte>. aufgerufen am 19.05.2017
- Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V. – VDMA (2017): Interviewserie „Kreislaufwirtschaft“. Interview mit Georg Tinschert, Geschäftsführer von WITTMANN-BATTENFELD. Pressemitteilung vom 29.09.2017. <https://kug.vdma.org/viewer/-/v2article/render/20813382>. Zuletzt abgerufen: 28.09.2018
- VinylPlus (2015): PVC-Recycling-Technologien. http://www.vinylplus.eu/uploads/2015-12-08_Recycling-Technologies-German.pdf. aufgerufen am 03.05.2017
- Waller, H. (2003): Kunststoffe als Rohwerkstoffe für den Abwasserbereich. In Kunststoffrohrsysteme in der Abwassertechnik. Hrsg. Kunststoffrohrverband e.V. Bonn. Vulkan Verlag. Essen
- Wang, Chongqing; Wang, Hui ; Fu, Jian-gang; Liu, Younian (2015a): Flotation separation of waste plastics for recycling—A review, *Waste Management* 41 28–38
- Wang, Chongqing; Wang, Hui; Fu, Jianguang; Zhang, Lingling; Luo, Chengcheng; Liu, Younian (2015c): Flotation separation of polyvinyl chloride and polyethylene terephthalate plastics combined with surface modification for recycling, *Waste Management* 45 112–117
- Wang, Chong-qing; Wang, Hui; Gu, Guo-hua; Fu, Jian-gang; Lin, Qing-quan; Liu, You-nian (2015d): Interfacial interactions between plastic particles in plastics flotation, *Waste Management* 46 56–61
- Wang, Chong-Qing; Wang, Hui; Liu, You-Nian (2015b): Separation of polyethylene terephthalate from municipal waste plastics by froth flotation for recycling industry, *Waste Management* 35 42–47
- Wang, Jianchao; Wang, Hui; Wang, Chongqing; Zhang, Lingling; Wang, Tao; Zheng, Long (2017): A novel process for separation of hazardous poly(vinyl chloride) from mixed plastic wastes by froth flotation, *Waste Management* (Article in Press)
- Welle, Frank (2011): Twenty years of PET bottle to bottle recycling—An overview, *Resources, Conservation and Recycling* 55 (2011) 865–875
- Welle, Frank (2013): Is PET bottle-to-bottle recycling safe? Evaluation of post-consumer recycling processes according to the EFSA guidelines, *Resources, Conservation and Recycling* 73 41–45
- Wilts, H.; von Gries, N.; Dehne, I.; Oetjen-Dehne, R.; Buschow, N.; Sanden, J. (2016): Entwicklung von Instrumenten und Maßnahmen zur Steigerung des Einsatzes von Sekundärrohstoffen – mit Schwerpunkt Sekundärkunststoffe. UBA-Texte 65/2016. Dessau-Roßlau
- Windmüller & Hölscher (2013): Das Geheimnis ist gelüftet: E-24 ist VAREX II !. <http://www.wuh-lengerich.de/de/nc/units/presse/details/news/das-geheimnis-wird-gelueftet-e-24-ist-varex-ii/>. am 06.07.2017.
- Woidasky, J Lang-Koetz, C.; Heyde, M.; Wiethoff, S.; Sander, I.; Schau, A.; Moesslein, J.; Fahr, M.; Richards, B.; Turshatov, A; Sorg, F (2018): Tracer Based Sorting – Innovative Sorting Options for Post Consumer Products, *Recycling & Waste Processing* 2018, S. 105-110, https://www.hs-pforzheim.de/fileadmin/user_upload/uploads_redakteur/Forschung/INEC/Dokumente/Publikationen/Woidasky_et_al_Tracer_Based_Sorting_2018.pdf
- Woidasky, Jörg; Heyde, Michael; Sander, Immo; Moesslein, Jochen; Fahr, Martin; Richards, Bryce; Turshatov, Andrey; Lang-Koetz, Claus: Hochwertiges Recycling durch Tracer-Nutzung. Mit dem „Tracer-Based-Sorting“-Ansatz sollen Verkaufsverpackungen zielgerichtet aus dem Abfallstrom abgetrennt werden. In: *ReSource*, 30. Jahrgang 2017, Heft 4, 2017, S. 24-28.

Wurbs, J.; Beer, I. Bolland, T.; Debiak, M.; Dettling, F.; Koch-Jugl, J.; Tietjen, L.; Walther, M.; Wuttke, J.; Stolzenberg, H.-Ch.; Rauert, C.; Apel, P. (2017): Hexabromcyclododecan (HBCD) Antworten auf häufig gestellte Fragen, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau 2017, https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/421/publikationen/faq_hbcd_de_17.pdf

Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz – BMJV (2008): Handbuch der Rechtsförmlichkeit, 22.09.2008

Gesetze, Verordnungen und Normen

AltfahrzeugV - Altfahrzeug-Verordnung. Verordnung über die Überlassung, Rücknahme und umweltverträgliche Entsorgung von Altfahrzeugen. Fassung vom 21.06.2002. BGBl. I Nr. 41 vom 28.06.2002 zuletzt geändert am 02.12.2016

DIN EN ISO 1133-1:2012-03: Kunststoffe – Bestimmung der Schmelze-Massefließrate (MFR) und der Schmelze-Volumenfließrate (MVR) von Thermoplasten – Teil 1: Allgemeine Prüfverfahren.

DIN EN ISO 1628-5:2015-5: Kunststoffe – Bestimmung der Viskosität von Polymeren in verdünnter Lösung durch ein Kapillarviskosimeter – Teil 5: Thermoplastische Polyester (TP) Homopolymerer und Copolymere.

DIN EN ISO 527-1:2012: Kunststoffe – Bestimmung der Zugeigenschaften – Teil 1: Allgemeine Grundsätze.

DIN EN ISO 868:2003: Kunststoffe und Hartgummi – Bestimmung der Eindruckhärte mit einem Durometer (Shore-Härte).

DIN EN ISO 179-1:2010: Kunststoffe – Bestimmung der Charpy-Schlageigenschaften – Teil 1: Nicht instrumentierte Schlagzähigkeitsprüfung.

DIN EN ISO 1628-2:1999-11: Kunststoffe - Bestimmung der Viskosität von Polymeren in verdünnter Lösung unter Verwendung von Kapillarviskosimetern - Teil 2: Vinylchlorid-Polymere

ElektroG - Elektro- und Elektronikgerätegesetz vom 20. Oktober 2015 (BGBl. I S. 1739), zuletzt geändert 26. Juni 2017 (BGBl. I S. 1966)

BImSchG - Bundes-Immissionsschutzgesetz, Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge vom 17. Mai 2013 (BGBl. Nr. 25 S. 1274), zuletzt geändert 08.04.2019

Anhang

Anhang 1: Erläuterndes Beispiel für Ausbeute, Selektivität und Reinheit einer Stofffraktion

Fe-Metallgehalt im Inputmaterial	(a)	50 kg
mittels Fe-Metallabscheider abgetrennte Fe-Metallfraktion (Fe-Metalle und Störstoffe)	(b)	63 kg
Fe-Metalle in der abgetrennten Fe-Metallfraktion	(c)	45 kg
Ausbeute	(b) / (a)	126 %
Selektivität	(c) / (a)	90 %
Reinheit	(c) / (b)	71,4 %

Dehne et al. 2015

Anhang 2: DSD-Spezifikationen für unterschiedliche Kunststoff-Fraktionen

Kunststoff-Fraktion (DSD-Spezifikation)	Beschreibung	Enthaltene Kunststoffsorten
Kunststoff-Folien (310, 310-1)	Folien im Format > DIN A4 z. B. Beutel, Tragetaschen und Schrumpffolien	PP, PE, PET
Gemischte Kunststoffflaschen (320)	Formstabile Kunststoffartikel mit einem Volumen ≤ 5 Liter z. B. Getränke-, Waschmittel- und Haushaltsreinigerflaschen	PP, PE, PET
PO Kunststoff-Flaschen (321)	Formstabile Kunststoffartikel mit einem Volumen ≤ 5 Liter z. B. Spülmittel- und Haushaltsreinigerflaschen	PP, PE
Kunststoff-Hohlkörper (322)	Formstabile Kunststoffartikel: Flaschen > 5 Liter sowie Eimer, Kanister und Großgebilde ≤ 200 Liter	PP, PE
Gemischte Polyolefin-Artikel - MPO (323)	Kunststoffartikel z. B. Flaschen, Becher, Schalen, Folien sowie stoffgleiche Haushalts- und Kunststoffartikel	PP, PE
Polypropylen (324)	Formstabile, systemverträgliche Kunststoffartikel aus Polypropylen, Volumen ≤ 5 Liter wie z. B. Flaschen, Schalen und Becher, inkl. Nebenbestandteilen wie Verschlüssen, Etiketten usw.	PP
PET-Flaschen, Transparent (325)	Formstabile, systemverträgliche Verpackungen aus Polyethylenterephthalat (PET), Volumen ≤ 5 Liter	PET
Misch-PET (328-1 bis 328-3)	Formstabile, systemverträgliche Verpackungen aus Polyethylenterephthalat (PET), Volumen ≤ 5 Liter in der Zusammensetzung 1. Flaschen transparent, 2. sonstige formstabile PET-Verpackungen im Verhältnis 90:10, 70:30 oder 50:50	PET
Polyethylen (329)	Formstabile, systemverträgliche Kunststoffartikel aus Polyethylen, Volumen ≤ 5 Liter	PE
Becher (330)	Formstabile, systemverträgliche Verkaufsverpackungen aus Kunststoff, Volumen ≤ 1 Liter	PS, PP
Polystyrol (331)	formstabile, systemverträgliche Kunststoffartikel aus Polystyrol, Volumen ≤ 1 Liter	PS

Kunststoff-Fraktion (DSD-Spezifikation)	Beschreibung	Enthaltene Kunststoffsorten
Expandiertes Polystyrol (340)	systemverträgliche Verpackungen aus expandiertem Polystyrol, grobkörnig und weiß,	EPS
Mischkunststoffe (350)	Artikel aus verpackungstypischen Kunststoffen	PP, PE, PS, PET
Formstabile Kunststoffe Qualität 1 bis 4 (351-1 bis 351-4)	Formstabile Verkaufsverpackungen aus Kunststoff z. B. Becher, Flaschen, Schalen	PP, PE, PS
Schwarze FSK (351-5)	Formstabile Verkaufsverpackungen aus Kunststoff z. B. Becher, Flaschen, Schalen	PP, PE, PS, PET
Mischkunststoffe (352, 352-1)	Artikel aus verpackungstypischen Kunststoffen	PP, PE, PS

Quelle: DSD-Spezifikationen

Hintergrund und Ziele

Das Aufkommen an Kunststoffabfällen steigt stetig an. Seit dem Jahr 1994 hat sich das Gesamtkunststoffabfallaufkommen in Deutschland von 2,80 Mio. Mg auf 5,92 Mio. Mg im Jahr 2015 mehr als verdoppelt. Der Großteil (rund 5 Mio. Mg, ca. 85 Ma.-%) entfällt auf die sogenannten Post-Consumer-Abfälle. Dies sind die in Haushalten und im Gewerbebereich anfallenden Kunststoffabfälle. Die übrige Menge (15 Ma.-%) umfasst Abfälle aus der Produktion und Verarbeitung von Kunststoffen.

Während Kunststoffabfälle, die im Zusammenhang mit der Produktion und Verarbeitung anfallen, maßgeblich dem Recycling zugeführt werden, erfolgt die Rückführung von Kunststoffabfällen aus dem Post-Consumer-Bereich in den Materialkreislauf für weniger als 40 Ma. % (rund 1,92 Mio. Mg im Jahr 2015). Der überwiegende Anteil dieser Abfälle wird energetisch verwertet und steht einer erneuten Verwendung nicht mehr zur Verfügung.

Angesichts der Umweltvorteile einer hochwertigen, auf die Substitution von Primärkunststoffen abzielenden werkstofflichen Verwertung, besteht daher dringender Handlungsbedarf, das Kunststoffrecycling von Abfällen aus dem Post-Consumer-Bereich weiter auszubauen. Mit dem Ziel, das technische Potenzial für eine Steigerung des Kunststoffrecyclings und des Rezyklateinsatzes zu identifizieren, hat das Umweltbundesamt ein Ressortforschungsplan-Projekt initiiert, das die Kunststoffverwertungsbranche – hierzu zählen vorgelagerte Sortierprozesse, Kunststoffaufbereitungsprozesse sowie der Einsatz von Kunststoffrezyklaten – stärker in den Fokus nimmt. Die Bearbeitung erfolgt durch das ifeu Institut Heidelberg in Zusammenarbeit mit dem Ingenieurbüro u.e.c. Berlin, dem Wuppertal Institut sowie dem Unternehmen MAKSC.

Vorgehen

Das Forschungsprojekt gliedert sich in die folgenden:

- Ermittlung und Beschreibung des Standes der Technik für die Bereiche Sortierung, werkstoffliche Verwertung von Kunststoffabfällen sowie für den Rezyklateinsatz (AP1).
- Analyse des technischen Potenzials zur Steigerung des Kunststoffrecyclings und des Rezyklateinsatzes in Deutschland (AP2).
- Festlegung von Kriterien für die Bewertung von innovativen Techniken und technischen Verfahrensschritten bezüglich ihres Umweltentlastungspotenzials (AP3).

Dieses Interview findet im Rahmen von AP2 statt und dient der

- Identifikation innovativer Ansätze und Techniken,
- Potenzialabschätzung für die identifizierten Techniken und Ansätze,
- Abschätzung der dadurch erreichbaren Umweltentlastungen und
- der wirtschaftlichen Einschätzung der identifizierten Techniken und Ansätze.

Das Interview wird im Rahmen des Projekts dokumentiert und ausgewertet. Die Interviewergebnisse selber werden nicht veröffentlicht.

Angaben zur Person

Unternehmen:

Tätigkeitsschwerpunkt des Unternehmens:

Name:

Funktion im Unternehmen:

Interviewer:

Themenfelder

1 Sortierung

1.1 Nutzung zusätzlicher Detektoren zur Trennung schwarzer Kunststoffe

- a) Welches Potenzial besteht bei der verbesserten Identifikation und Trennung schwarzer Kunststoffe?
- b) Woran scheidet bisher der Einsatz von Verfahren zur Identifikation schwarzer Kunststoffe?

1.2 Nutzung von Markern zur Verbesserung der Identifikation von Kunststoffen

- a) Bieten Marker eine praktikable Möglichkeit zur besseren Identifikation von Kunststoffen?
- b) Wo liegen mögliche Probleme beim Einsatz von Markern?

1.2 Notwendigkeit zur besseren Identifikation von gefüllten Kunststoffen.

- a) Besteht die Notwendigkeit zur besseren Identifikation von gefüllten Kunststoffen?
- b) Welche Verfahren könnten hierbei eingesetzt werden?
- c) Wie genau und vielfältig sollte die Identifikation und Sortierung von Kunststoffen erfolgen um ein hochwertiges Recycling zu ermöglichen?

1.4 Notwendigkeit zur besseren Identifikation von Verbänden.

2 Verwertung

2.1 Wäsche

- a) Welches Potenzial besteht in einer besseren Wäsche von Altkunststoffen? (z. B. hinsichtlich der Qualität der Rezyklate)
- b) Welche Verfahren könnten dafür eingesetzt werden?
- c) Welches Potenzial besteht bei der Optimierung der Wäsche (z. B. hinsichtlich Energieverbrauch und Wasserverbrauch)?
- d) Wie sieht das Kosten-Nutzen-Verhältnis bei einer Optimierung der Wäsche aus?
- e) Ist absehbar, dass es bei der Wäsche von Kunststoffabfällen zu Veränderungen kommen wird?

2.2 Flotation

- a) Flotation wird in der einschlägigen Literatur diskutiert, wie groß ist das Potenzial zur Verbesserung der Rezyklatqualität und Erhöhung der Ausbeute durch Flotation?
- b) Wie würde der Einsatz einer Flotation sich auf die Kosten der Aufbereitung auswirken?
- c) Ist von einem verstärkten Einsatz von Flotationen beim Kunststoffrecycling absehbar?
- d) Wo liegen gegebenenfalls die technischen und ökonomischen Hemmnisse?

2.3 Neue Sortiersysteme

- a) Welche Rolle können neue Sortiersysteme bei der Verwertung von Kunststoffen spielen?
- b) Welche Sortiersysteme würden sich besonders eignen?
- c) Wo gibt es Defizite bei der Identifikation von Kunststoffen?

3 Rezyklateinsatz

3.1 Kompatibilisierung

- a) Welche Bedeutung kann eine Kompatibilisierung von Kunststoffen für ihren Wiedereinsatz spielen?
- b) Welche Bedeutung kann eine Kompatibilisierung gegenüber einer besseren Trennung haben?
- c) Welche Einsatzmöglichkeiten und -grenzen gibt es.

3.2 Anforderungsgerechte Werkstoffauswahl

- a) Werden die Kunststoffe anforderungsgerecht ausgewählt oder bestehen hier Optimierungspotenziale?
- b) Werden zu hochwertige Werkstoffe eingesetzt?
- c) Ist es vorstellbar, die Vielfalt der Kunststoffsorten einzuschränken? (z. B. durch den Einsatz vielseitig einsetzbarer Kunststoffe (Bsp. PET))
- d) Kann der Einsatz von Rezyklaten Einfluss auf die Gestaltung von Produkten und Einsatz von Rezyklaten?