

TEXTE

120/2023

Teilbericht

Praxis der Sortierung und Verwertung von Verpackungen im Sinne des § 21 VerpackG 2021/2022

von:

Svenja Grummt, Matthias Fabian

Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau

Herausgeber:

Umweltbundesamt

TEXTE 120/2023

Ressortforschungsplan des Bundesministeriums für
Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und
Verbraucherschutz

Forschungskennzahl 3722 34 309 0
FB001214

Praxis der Sortierung und Verwertung von Verpackungen im Sinne des § 21 VerpackG 2021/2022

Teilbericht 2 des ReFoPlan-Vorhabens „Ermittlung der
Praxis der Sortierung und Verwertung von Verpackungen
im Sinne des § 21 VerpackG für den Zeitraum 2021 bis
2024, Empfehlungen zur Fortentwicklung des
Mindeststandards zur Ermittlung der Recyclingfähigkeit
und Entwicklung von Guidelines für umweltfreundliche
Verpackungsgestaltung“

von

Svenja Grummt, Matthias Fabian
Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau

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

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

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

Durchführung der Studie:

Umweltbundesamt
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau

Abschlussdatum:

Juli 2023

Redaktion:

Fachgebiet III 1.6 Kunststoffe und Verpackungen
Matthias Fabian

Publikationen als pdf:

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

ISSN 1862-4804

Dessau-Roßlau, August 2023

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren. Die Studie basiert in weiten Teilen auf dem Teilbericht 1 UBA-TEXTE 125/2022 „Praxis der Sortierung und Verwertung 2020/2021“ von Grummt (2022).

Kurzbeschreibung: Praxis der Sortierung und Verwertung von Verpackungen im Sinne des § 21 VerpackG 2021/2022

Um die negativen Umweltauswirkungen von Verpackungsabfällen zu reduzieren und ein hochwertiges Recycling zu stärken, verpflichtet das Verpackungsgesetz (VerpackG) in § 21 die dualen Systeme, finanzielle Anreize zu schaffen, um hochgradig recyclingfähige Verpackungen zu fördern. Die Ermittlung der Recyclingfähigkeit von Verpackungen muss sich nach VerpackG an der aktuellen Praxis der Sortierung und Verwertung orientieren, d. h. an den bestehenden Möglichkeiten und Grenzen der Sortier- und Verwertungsinfrastruktur.

Der vorliegende Bericht gibt einen Überblick über die für die Jahre 2021 und 2022 ermittelte Praxis der Sortierung und Verwertung deutscher Verpackungsabfälle, die typischerweise bei privaten Endverbrauchern als Abfall anfallen und über die Altglas-, Altpapier- und Leichtverpackungssammlung erfasst werden (systembeteiligungspflichtige Verpackungen). Die Praxis wurde auf Basis von Erhebungen bestimmt. Sortierer und Verwerter deutscher Verpackungsabfälle wurden nach aktueller Prozesstechnik und spezifischen Problemen bei der Sortierung und Verwertung und einer Einschätzung dazu befragt. Dabei wurde das Recycling von Behälterglas, Altpapier sowie Leichtstoffverpackungen betrachtet. UBA-TEXTE 11/2021 von Dehoust et al. diente als Grundlage für die verwendete Methode zur Ermittlung der Praxis. Der vorliegende Teilbericht 2 basiert in weiten Teilen auf dem Teilbericht 1 UBA-TEXTE 125/2022 „Praxis der Sortierung und Verwertung 2020/2021“ von Grummt (2022). Dieser zweite Teilbericht identifiziert und beschreibt Änderungen in der Prozesstechnik und den Mengenströmen gegenüber den vergangenen Jahren sowie innovative technische Potenziale beim Recycling. Altpapiersortieranlagen sowie Aufbereiter und Verwerter von Weißblech- und Aluminiumverpackungen wurden erstmalig befragt. Des Weiteren wird der Stand der Technik der Anlagen innerhalb der ermittelten Praxis eingestuft.

Die Ergebnisse aus der Studie dienen als wissenschaftliche Grundlage für die Fortentwicklung des „Mindeststandards zur Bemessung der Recyclingfähigkeit von systembeteiligungspflichtigen Verpackungen gemäß § 21 Abs. 3 VerpackG“. Insbesondere werden quantitative Aussagen über die Verfügbarkeit bestehender Sortier- und Verwertungsstrukturen (Anhang 1 des Mindeststandards) getroffen sowie Änderungsvorschläge für dessen Anhänge 2 und 3 gegeben. Der Bericht ordnet zudem die von den Sortierern und Verwertern angegebenen Probleme bei der Trennung, Sortierung und Verwertung ein.

Abstract: Determination of the practice of sorting and recovery in accordance with section 21 German Packaging act in the years 2021/2022

To reduce the negative environmental impact of packaging waste and to strengthen high-quality recycling, section 21 of the German Packaging Act (VerpackG) obliges the dual systems to create financial incentives to promote well-recyclable packaging. According to the VerpackG, the determination of the recyclability of packaging must be based on the current practice of sorting and recovery, i.e. on the existing possibilities and limits of the sorting and recovery infrastructure.

This report provides an overview of the sorting and recovery practice of German packaging waste typically generated as waste by private end consumers determined for the years 2021 and 2022 and collected via the waste glass, waste paper and lightweight packaging collections (packaging subject to system participation). The practice was determined on the basis of surveys. Sorters and recyclers of German packaging waste were asked about current process technology and specific problems in sorting and recovery and an assessment of these. The recycling of container glass, waste paper and lightweight packaging was considered. The method developed in UBA-TEXTE 11/2021 by Dehoust et al. was used to determine the practice. This

second sub-report is largely based on the first sub-report UBA-TEXTE 125/2022 "Praxis der Sortierung und Verwertung 2020/2021" by Grummt (2022). The report at hand identifies and describes changes in process technology and volume flows compared to previous years as well as innovative technical potentials in recycling. Waste paper sorting plants as well as reproprocessors and recyclers of tinsplate and aluminium packaging were surveyed for the first time. Furthermore, the state of the art of the plants within the identified practice is classified.

The results from the study serve as a scientific basis for the further development of the "Minimum Standard for determining the recyclability of packaging subject to system participation pursuant to section 21 (3) VerpackG". In this context, the findings allow quantitative statements on the availability of existing sorting and recovery structures (Annex 1 of the Minimum Standard) and proposals for amendments to its Annexes 2 and 3 are provided. This report also classifies the problems in separation, sorting and recovery indicated by the sorters and recyclers.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	11
Tabellenverzeichnis	13
Abkürzungsverzeichnis	15
Glossar	17
Zusammenfassung.....	19
Summary	26
1 Einleitung.....	33
2 Methode und Begriffserläuterungen zur Ermittlung der Praxis der Sortierung und Verwertung	35
2.1 Kurzbeschreibung der Methode	35
2.2 Berechnung der Anwendungsgrade	37
2.3 Definition einer hochwertigen werkstofflichen Verwertung.....	44
2.4 Quantitative Darstellung der Rezyklatanwendungen	44
2.5 Praxis der SuV und Mindeststandard nach § 21 Abs. 3 VerpackG.....	46
3 Ergebnisse der Erhebung und Ermittlung der Praxis der Sortierung und Verwertung	48
3.1 LVP-Sortierung	48
3.1.1 Rücklauf der Erhebung.....	48
3.1.2 Pfadbeschreibung	48
3.1.3 Ermittlung der Praxis der LVP-Sortierung	52
3.1.4 Einstufung problematischer Verpackungsmerkmale bei der Trennung und Sortierung	58
3.2 Verwertung von Kunststofffolien.....	61
3.2.1 Rücklauf der Erhebung.....	61
3.2.2 Pfadbeschreibung	62
3.2.3 Ermittlung der Praxis der SuV für Kunststofffolien.....	65
3.2.4 Rezyklatanwendungen.....	66
3.2.5 Einstufung problematischer Verpackungsmerkmale bei der Verwertung	66
3.3 Verwertung von PP und PE	68
3.3.1 Rücklauf der Erhebung.....	68
3.3.2 Pfadbeschreibung	69
3.3.3 Ermittlung der Praxis der SuV für PP und PE	72
3.3.4 Rezyklatwendungen.....	73
3.3.5 Einstufung problematischer Verpackungsmerkmale bei der Verwertung	75
3.4 Verwertung von MPO, PO-flex und PP-flex	78

3.4.1	Rücklauf der Erhebung.....	78
3.4.2	Pfadbeschreibung	79
3.4.3	Ermittlung der Praxis der SuV für MPO und PO-flex.....	81
3.4.4	Rezyklatanwendungen.....	83
3.4.5	Einstufung problematischer Verpackungsmerkmale bei der Verwertung	83
3.5	Verwertung von PS.....	85
3.5.1	Rücklauf der Erhebung.....	85
3.5.2	Pfadbeschreibung	85
3.5.3	Ermittlung der Praxis der SuV für PS.....	87
3.5.4	Rezyklatanwendungen.....	88
3.5.5	Einstufung problematischer Verpackungsmerkmale bei der Verwertung	88
3.6	Verwertung von PET.....	89
3.6.1	Rücklauf der Erhebung.....	89
3.6.2	Pfadbeschreibung	90
3.6.3	Ermittlung der Praxis der SuV für PET.....	94
3.6.4	Rezyklatanwendungen.....	95
3.6.5	Einstufung problematischer Verpackungsmerkmale bei der Verwertung	96
3.6.6	Störstoffkomponenten im Rejekt	98
3.7	Aufbereitung und Verwertung von Eisenmetallen und Eisenmetallverbunden.....	99
3.7.1	Rücklauf der Erhebung.....	99
3.7.2	Pfadbeschreibung	100
3.7.3	Ermittlung der Praxis der SuV für Eisenmetalle und Eisenmetallverbunde	102
3.7.4	Rezyklatanwendungen.....	103
3.7.5	Einstufung problematischer Verpackungsmerkmale bei der Aufbereitung und Verwertung	104
3.8	Aufbereitung und Verwertung von Aluminium und Aluminiumverbunden.....	105
3.8.1	Rücklauf der Erhebung.....	105
3.8.2	Pfadbeschreibung	106
3.8.3	Ermittlung der Praxis der SuV für Aluminium und Aluminiumverbunden	110
3.8.4	Rezyklatanwendungen.....	111
3.8.5	Einstufung problematischer Verpackungsmerkmale bei der Aufbereitung und Verwertung	112
3.9	Verwertung von FKN	114
3.9.1	Rücklauf der Erhebung.....	114
3.9.2	Pfadbeschreibung	115

3.9.3	Ermittlung der Praxis der SuV für FKN	116
3.9.4	Rezyklatanwendungen.....	118
3.9.5	Einstufung problematischer Verpackungsmerkmale bei der Verwertung	119
3.9.6	Störstoffkomponenten im Rejekt	120
3.10	Verwertung von PPK aus LVP	121
3.10.1	Rücklauf der Erhebung.....	121
3.10.2	Pfadbeschreibung	122
3.10.3	Ermittlung der Praxis der SuV für PPK aus LVP	123
3.10.4	Rezyklatanwendungen.....	125
3.10.5	Einstufung problematischer Verpackungsmerkmale bei der Verwertung	126
3.10.6	Störstoffkomponenten im Rejekt	127
3.11	Sortierung von PPK aus dem Blauen System	128
3.11.1	Rücklauf der Erhebung.....	128
3.11.2	Pfadbeschreibung	129
3.11.3	Ermittlung der Praxis der PPK-Sortierung.....	131
3.11.4	Einstufung problematischer Verpackungsmerkmale bei der Sortierung	132
3.11.5	Störstoffkomponenten im Rejekt	133
3.12	Verwertung von PPK aus dem Blauen System	134
3.12.1	Rücklauf der Erhebung.....	134
3.12.2	Pfadbeschreibung	135
3.12.3	Ermittlung der Praxis der SuV für PPK	137
3.12.4	Rezyklatanwendungen.....	138
3.12.5	Einstufung problematischer Verpackungsmerkmale bei der Verwertung	139
3.12.6	Störstoffkomponenten im Rejekt	139
3.13	Aufbereitung von Behälterglas	140
3.13.1	Rücklauf der Erhebung.....	140
3.13.2	Pfadbeschreibung	140
3.13.3	Ermittlung der Praxis der SuV für Behälterglas	145
3.13.4	Rezyklatanwendungen.....	145
3.13.5	Einstufung problematischer Verpackungsmerkmale bei der Aufbereitung	146
4	Empfehlungen zur Berücksichtigung der Praxis der SuV im Mindeststandard gemäß § 21 Abs. 3 VerpackG	151
4.1	Vorhandensein von Sortier- und Verwertungsinfrastruktur.....	151
4.2	Sortier- und Trennbarkeit sowie Recyclingunverträglichkeiten	154

4.3	Zusammenfassung Stand der Praxis der Kunststoffverwertung.....	155
4.4	Zusammenfassung Rezyklatanwendungen der Verwerter	157
5	Quellenverzeichnis	158
A	Erhebungsbögen.....	164
A.1	LVP-Sortieranlagen.....	164
A.1.1	Erhebungsbogen LVP-Sortieranlagen	164
A.1.2	Fragenkatalog LVP-Sortieranlagen.....	170
A.2	Erhebungsbogen Kunststofffolien-Verwertung	171
A.3	Erhebungsbogen PP-Verwertung.....	175
A.4	Erhebungsbogen PE-Verwertung.....	178
A.5	Erhebungsbogen MPO- und PO-flex-Verwertung.....	181
A.6	Erhebungsbogen PS-Verwertung	184
A.7	Erhebungsbogen PET-Verwertung.....	187
A.8	Erhebungsbogen Aluminiumaufbereitung und -verwertung.....	192
A.9	Erhebungsbogen Weißblechaufbereitung und -verwertung.....	196
A.10	Erhebungsbogen FKN- und PPK aus LVP-Verwertung.....	199
A.11	Erhebungsbogen PPK-Sortieranlagen	202
A.12	Erhebungsbogen Verwertung von PPK aus der Monoerfassung.....	206
A.13	Erhebungsbogen Glasaufbereitung	209
B	Auswertung der Erhebungsbögen und des Fragenkatalogs.....	212
B.1	Auswertung LVP-Sortieranlagen	212
B.2	Auswertung Kunststofffolien-Verwertung.....	212
B.3	Auswertung PP-Verwertung	212
B.4	Auswertung PE-Verwertung.....	212
B.5	Auswertung MPO- und PO-flex-Verwertung	212
B.6	Auswertung PS-Verwertung.....	212
B.7	Auswertung PET-Verwertung.....	212
B.8	Auswertung Aluminiumaufbereitung und -verwertung	212
B.9	Auswertung Weißblechaufbereitung und -verwertung.....	212
B.10	Auswertung FKN- und PPK aus LVP-Verwertung	212
B.11	Auswertung PPK-Sortieranlagen.....	213
B.12	Auswertung Verwertung von PPK aus der Monoerfassung.....	213
B.13	Auswertung Glasaufbereitung	213

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Baumdiagramm zur Veranschaulichung der Berechnung des Anwendungsgrades der Sortierung und Verwertung $P(A_{SuV})$...	39
Abbildung 2: Definitionen der drei Anwendungsgrade $P(A_S)$, $P(A_V)$ und $P(A_{SuV})$	39
Abbildung 3: Baumdiagramm zur Veranschaulichung der Berechnung des Anwendungsgrades der Verwertung $P(A_V)$ für Glas	43
Abbildung 4: Prozesse der hochwertigsten werkstofflichen Verwertung (Referenzanlagen) nach Definition des Mindeststandards	45
Abbildung 5: Schematische Darstellung über den Stand der Praxis der LVP- Sortierung	50
Abbildung 6: Praxis der Sortierung für 2020 bis 2022 – Zweigwahrscheinlichkeiten der Sortierprozessvarianten der Feinkornabsiebung und Anwendungsgrad der Sortierung $P(A_S)$	53
Abbildung 7: Praxis der Sortierung für 2020 bis 2022 – Zweigwahrscheinlichkeiten der Sortierprozessvarianten formstabiler Kunststoffverpackungen und Anwendungsgrad der Sortierung $P(A_S)$	55
Abbildung 8: Praxis der Sortierung für 2020 bis 2022 – Zweigwahrscheinlichkeiten der Sortierprozessvarianten flexibler Kunststoffverpackungen und Anwendungsgrad der Sortierung $P(A_S)$	56
Abbildung 9: Schematische Darstellung der Pfadbeschreibung für die Sortierung und Verwertung von Kunststofffolien	64
Abbildung 10: Praxis der SuV für Kunststofffolien (Bezugsjahre 2021/2022)	65
Abbildung 11: Rezyklatanwendungen der Referenzanlagen (Bezugsjahr 2021) für die Verwertung von Kunststofffolien	66
Abbildung 12: Schematische Darstellung der Pfadbeschreibung für die Sortierung und Verwertung von formstabilen PP- und PE-Verpackungen	71
Abbildung 13: Praxis der SuV für formstabile PP-Verpackungen (Bezugsjahre 2021/2022)	72
Abbildung 14: Praxis der SuV für formstabile PE-Verpackungen (Bezugsjahre 2021/2022)	73
Abbildung 15: Rezyklatanwendungen der Referenzanlagen (Bezugsjahr 2021) für die Verwertung von PP-Verpackungen	74
Abbildung 16: Rezyklatanwendungen der Referenzanlagen (Bezugsjahr 2021) für die Verwertung von PE-Verpackungen	75
Abbildung 17: Schematische Darstellung der Pfadbeschreibung für die Sortierung und Verwertung von flexiblen PO-Verpackungen	81
Abbildung 18: Praxis der SuV für flexible PP-Verpackungen (Bezugsjahre 2021/2022)	82
Abbildung 19: Rezyklatanwendungen der Referenzanlagen (Bezugsjahr 2021) für die Verwertung von formstabilen und flexiblen PO- Verpackungen	83

Abbildung 20: Schematische Darstellung der Pfadbeschreibung für die Sortierung und Verwertung von formstabilen PS-Verpackungen (ohne EPS)	87
Abbildung 21: Praxis der SuV für formstabile PS-Verpackungen ohne EPS (Bezugsjahre 2021/2022)	88
Abbildung 22: Schematische Darstellung der Pfadbeschreibung für die Sortierung und Verwertung von PET-Verpackungen (i. d. R. PET-Flaschen)	93
Abbildung 23: Praxis der SuV für PET-Flaschen, transparent; exemplarischer $P(A_{SuV})$ der PET-Fraktionen 325 und 328-(0-3) mit minimalen Anteilen an transparenten PET-Flaschen gemäß Spezifikation und Angabe der Spannweite für $P(A_{SuV})$ für PET Flaschen, transparent (Bezugsjahre 2021/2022)	95
Abbildung 24: Rezyklatanwendungen der Referenzanlagen (Bezugsjahr 2021) für die Verwertung von PET-Verpackungen	96
Abbildung 25: Schematische Darstellung der Pfadbeschreibung für die Sortierung und Verwertung von Verpackungen aus Weißblech und Weißblechverbunden	101
Abbildung 26: Praxis der SuV für 2021/2022 für Verpackungen aus Eisenmetallen und Eisenmetallverbunden	103
Abbildung 27: Schematische Darstellung der Pfadbeschreibung für die Sortierung und Verwertung von Verpackungen aus Aluminium und Aluminiumverbunden	109
Abbildung 28: Praxis der SuV für 2021/2022 für Verpackungen aus Aluminium und Aluminiumverbunden	111
Abbildung 29: Schematische Darstellung der Pfadbeschreibung für die Sortierung und Verwertung von FKN	116
Abbildung 30: Praxis der SuV für 2021/2022 für FKN	118
Abbildung 31: Rezyklatanwendungen der Referenzanlagen (Bezugsjahr 2021) für die Verwertung von FKN	119
Abbildung 32: Schematische Darstellung der Pfadbeschreibung für die Sortierung und Verwertung von PPK aus LVP	123
Abbildung 33: Praxis der SuV für 2021/2022 für PPK aus LVP	125
Abbildung 34: Rezyklatanwendungen der Referenzanlagen (Bezugsjahr 2021) für die Verwertung von PPK aus LVP	126
Abbildung 35: Schematische Darstellung der Pfadbeschreibung für die PPK-Sortierung aus dem Blauen System	131
Abbildung 36: Schematische Darstellung der Pfadbeschreibung für die Sortierung und Verwertung von PPK aus dem Blauen System	136
Abbildung 37: Praxis der SuV für 2021/2022 für PPK-Verpackungen aus dem Blauen System	137
Abbildung 38: Boxplot der Stofflösezeiten der Papierfabriken (Blaues System)	138

Abbildung 39: Rezyklatanwendungen der Referenzanlagen (Bezugsjahr 2021) für die Verwertung von PPK aus dem Blauen System.....	139
Abbildung 40: Schematische Darstellung der Pfadbeschreibung für die Aufbereitung von Behälterglas.....	142
Abbildung 41: Praxis der SuV für 2021/2022 für Behälterglas.....	145
Abbildung 42: Rezyklatanwendungen der Referenzanlagen (Bezugsjahre 2021/2022)	157

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Weitere Anwendungsgrade der Sortierung P(A ₅) für 2019 bis 2022.....	58
Tabelle 2: Problematische Verpackungsmerkmale bei der Trennung und Sortierung (Gesamtanzahl an LVP-Sortieranlagen mit ausgefülltem Fragenkatalog: 37)	59
Tabelle 3: Einschätzung der Verwerter von Kunststofffolien zu problematischen Verpackungsmerkmalen (Gesamtanzahl Referenzanlagen: 23)	67
Tabelle 4: Einschätzung der PP-Verwerter zu problematischen Verpackungsmerkmalen (Gesamtanzahl an Referenzanlagen: 28).....	76
Tabelle 5: Einschätzung der PE-Verwerter zu problematischen Verpackungsmerkmalen bei der Verwertung (Gesamtanzahl an Referenzanlagen: 31).....	77
Tabelle 6: Einschätzung der MPO und PO-/PP-flex-Verwerter zu problematischen Verpackungsmerkmalen (Gesamtanzahl an Referenzanlagen: 16).....	84
Tabelle 7: Einschätzung der PS-Verwerter zu problematischen Verpackungsmerkmalen (Gesamtanzahl an Referenzanlagen: 10).....	89
Tabelle 8: Einschätzung der PET-Verwerter zu problematischen Verpackungsmerkmalen (Gesamtanzahl an Referenzanlagen: 9)	97
Tabelle 9: Störstoffkomponenten im Rejekt nach Einschätzung der PET-Verwerter (Gesamtanzahl an Referenzanlagen: 9).....	98
Tabelle 10: Einschätzung der Eisenmetallaufbereiter und -verwerter zu problematischen Verpackungsmerkmalen (Gesamtanzahl an Referenzanlagen: 13).....	104
Tabelle 11: Einschätzung der Aluminiumaufbereiter und -verwerter zu problematischen Verpackungsmerkmalen (Gesamtanzahl an Referenzanlagen: 8).....	113
Tabelle 12: Einschätzung der Verwerter von FKN zu problematischen Verpackungsmerkmalen (Gesamtanzahl an Referenzanlagen: 7)	120

Tabelle 13: Störstoffkomponenten im Rejekt nach Einschätzung der FKN- Verwerter (Gesamtanzahl an Referenzanlagen: 7)	121
Tabelle 14: Einschätzung der PPK aus LVP-Verwerter zu problematischen Verpackungsmerkmalen (Gesamtanzahl an Referenzanlagen: 4)	127
Tabelle 15: Störstoffkomponenten im Rejekt nach Einschätzung der PPK aus LVP- Verwerter (Gesamtanzahl an Referenzanlagen: 4)	127
Tabelle 16: Einschätzung der PPK-Sortieranlagen zu problematischen Verpackungsmerkmalen (Gesamtanzahl an Rückläufern mit sensorgestützter Sortierung: 29).....	132
Tabelle 17: Aussortierung und energetische Verwertung von faserbasierten Verpackungen oder -komponenten (Gesamtanzahl an Referenzanlagen: 45).....	134
Tabelle 18: Einschätzung der Glasaufbereiter zu problematischen Verpackungsmerkmalen (Gesamtanzahl an Referenzanlagen: 22).....	146
Tabelle 19: Anwendungsgrade in Bezug zu Anhang 1 des Mindeststandards 2022	151
Tabelle 20: Stand der Praxis der Verwertung von Kunststoffen aus den Ergebnissen der Erhebungsbögen	156

Abkürzungsverzeichnis

Abs.	Absatz
Alu	Aluminium
BVT	beste verfügbare Technik, engl. best available techniques
EBS	Ersatzbrennstoff
EK III	Expertenkreis III
engl.	Englisch
EPS	Expandiertes Polystyrol
et al.	und andere
EuPIA	Europäischer Druckfarbenverband, engl. European Printing Ink Association
EVA	Ethylen-Vinylacetat-Copolymer
EVOH	Ethylen-Vinylalkohol-Copolymer
Fe	Eisen
FKN	Flüssigkeitskarton
FSK	Formstabile Kunststoffe
HDPE	High-Density Polyethylene
I	Integrierte Aufbereitung
i. d. R.	in der Regel
i. H. v.	in Höhe von
inkl.	inklusive
i. S. d.	im Sinne des/der
IK	Industrievereinigung Kunststoffverpackungen
KA-Sortierung	Kunststoffartensortierung
KSP, CSP	Keramik, Steine und Porzellan, engl. ceramics, stones and porcelain
LDPE	Low-Density Polyethylene
LVP	Leichtverpackungen
mind.	mindestens
MKS	Mischkunststoffe
MPO	Gemischte Polyolefine
MSN	Mengenstromnachweis
NC	Cellulosenitrat (umgangssprachlich: Nitrozellulose)
NE	Nichteisen
NIR	Nah-Infrarot
P(A)	Wahrscheinlichkeit (engl. probability) eines Ereignisses A
PA	Polyamid
PAK	Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe
PC	Polycarbonat
PE	Polyethylen

Abs.	Absatz
PET	Polyethylenterephthalat
PET-A	Amorphes PET
PET-C	Kristallines PET
PET-G	Glycol-modifiziertes PET
PE-X	Vernetztes Polyethylen
PLA	Polymilchsäure, engl. Polylactid Acid
PMMA	Polymethylmethacrylat (Acrylglas)
PO	Polyolefin (z. B. Polyethylen, Polypropylen)
PO-flex	Flexible, gemischte Polyolefine
POM	Polyoxymethylen
PP	Polypropylen
PPK, PPC	Papier, Pappe, Kartonagen, engl. paper, paper board and cardboard packaging
PS	Polystyrol
PU	Polyurethan
PVC	Polyvinylchlorid
PVDC	Polyvinylidenchlorid
S	Sortierung
SSP	Solid State Polymerisation
SuV, SaR	Sortierung und Verwertung, engl. sorting and recovery
UBA	Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau
URRC	United Resource Recovery Corporation
UV	Ultraviolett
V	Verwertung
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VerpackG	Verpackungsgesetz
VIS	Sichtbar, engl. visible
ZSVR	Stiftung Zentrale Stelle Verpackungsregister

Glossar

(duales) System	Privatrechtlich organisierte juristische Person oder Personengesellschaft, welche die haushaltsnahe Sammlung und Entsorgung von gebrauchten systembeteiligungspflichtigen Verpackungen organisiert (vgl. § 3 Abs. 16 VerpackG).
(Sortier-)Fraktion	Gruppe von Stoffen, Merkmale sind definiert in Produktspezifikationen.
Anwendungsgrad der Sortierung $P(A_S)$	Wahrscheinlichkeit, dass eine Verpackung in einer LVP-Sortieranlage auf eine spezifische Sortiertechnik trifft. Annahme: Alle LVP-Sortieranlagen erhalten als Eingangsmaterial die gleiche Verteilung an Verpackungen.
Anwendungsgrad der Verwertung $P(A_V)$	Wahrscheinlichkeit, dass eine Verpackung einer hochwertigen werkstofflichen Verwertung zugeführt wird (die Sortierung wird hierbei ausgeklammert). Diese Wahrscheinlichkeit ergibt sich aus den Verwertungszuführungsmengen.
Anwendungsgrad der Sortierung und Verwertung $P(A_{SuV})$	Wahrscheinlichkeit, dass eine Verpackung sowohl auf eine spezifische Sortiertechnik als auch auf einen hochwertigen werkstofflichen Verwertungspfad trifft.
Blaues System	Monoerfassung von PPK über die haushaltsnahe Sammlung.
Expertenkreis III (EK III)	Fachgremium, welches die Zentrale Stelle Verpackungsregister zum Mindeststandard berät.
Letztempfängeranlage	Anlage, in der ein Produkt mit festgelegten und reproduzierbaren Produkteigenschaften (beispielsweise nach DIN ISO 1042 Teil 1 bis 4) hergestellt wird. Dieses Produkt kann ohne weitere abfallspezifische Behandlungsschritte in einem Produktionsprozess verwendet werden. Die Einstufung als Letztempfängeranlage erfolgt nach der „Prüfleitlinien Mengenstromnachweis Systeme“ (ZSVR, 2020).
Mengenstromnachweis (MSN)	<i>„Überprüfbarer Nachweis der Erfüllung der Sammlungs- und Verwertungsanforderungen gemäß § 14 Absatz 1 Satz 1 [VerpackG], § 16, der gemäß § 17 Absatz 2 durch einen registrierten Sachverständigen im Sinne von §§ 3 Absatz 15,</i>

	27 Absatz 1 bescheinigt wird. Der MSN enthält die Dokumentation über die Verwertung der durch die flächendeckende Sammlung nach § 14 Absatz 1 Satz 1 erfassten restentleerten Verpackungen in Form von jeweils aggregierten Daten zu den an dem System beteiligten Mengen und zu den erfassten und der Vorbereitung zur Wiederverwendung oder dem jeweiligen Verwertungsverfahren zugeführten Mengen. Der MSN enthält außerdem die Berechnung der „Verwertungsquote“. „Bezugsjahr“ des MSN ist jeweils das vorangegangene Kalenderjahr.“ (ZSVR, 2020)
Recyclingfähigkeit	Eignung einer Verpackung, Neuware in werkstofftypischen Anwendungen zu substituieren, nachdem ein hochwertiger werkstofflicher Recyclingprozess durchlaufen wurde (ZSVR, 2022).
Referenzanlage	Anlage, in der eine hochwertige werkstoffliche Verwertung stattfindet.
Rezyklat	Produkt (Stoff oder Gemisch) aus Abfällen, welches geeignet ist, Neuware in werkstofftypischen Anwendungen zu substituieren (ZSVR, 2022).
Sortierpfad	Abfolge von Prozessen bei der Sortierung
Systembeteiligungspflichtige Verpackung	Verkaufs- und/oder eine Umverpackung, welche nach Gebrauch typischerweise beim privaten Endverbraucher als Abfall anfällt (vgl. § 3 Abs. 8 VerpackG).
Verbundverpackung	Kombination aus mindestens zwei unterschiedlichen Materialarten, die nicht von Hand trennbar sind (vgl. § 3 Abs. 5 VerpackG). Im Sinne dieses Berichtes werden nur solche Verpackungen als Verbundverpackung bezeichnet, bei denen die Hauptkomponente einen Massenanteil von 95 % nicht überschreitet (95/5-Regelung, angelehnt an § 16 Abs. 3 Satz 4 VerpackG).
Verwertungspfad	Abfolge von Prozessen bei der Verwertung.

Zusammenfassung

Das Verpackungsgesetz (VerpackG) verpflichtet die dualen Systeme in § 21, finanzielle Anreize im Rahmen der Beteiligungsentgelte zu schaffen, um hochgradig recyclingfähige Verpackungen zu fördern. Damit sollen negative Umweltauswirkungen von Verpackungsabfällen reduziert und eine hochwertige werkstoffliche Verwertung gefördert werden. Die Ermittlung der Recyclingfähigkeit von Verpackungen muss sich nach VerpackG an der aktuellen Praxis der Sortierung und Verwertung systembeteiligungspflichtiger Verpackungen orientieren.

Auch der Entwurf der zukünftigen EU-Verpackungsverordnung sieht es vor, hochgradig recyclingfähige Verpackungen finanziell zu belohnen (Eco Fee Modulation). Gemäß des Entwurfs sollen alle Verpackungen bis 2030 wirtschaftlich wiederverwendbar oder recycelbar sein (mit Ausnahme einzelner Verpackungen). Eine vollständige industrielle Recyclingfähigkeit aller Verpackungen ist bis 2035 geplant.

Begriffserläuterung „Praxis der Sortierung und Verwertung“

Die „Praxis der Sortierung und Verwertung“ (Praxis der SuV) beschreibt die Sortier- und Verwertungsinfrastruktur, auf die deutsche Verpackungsabfälle bei ordnungsgemäßer Entsorgung treffen. Sie erfasst sowohl Anlagen in Deutschland als auch im Ausland. Voraussetzung ist, dass die Anlagen nachweislich mit Mengen der deutschen dualen Systeme beliefert werden. Die Praxis der SuV umfasst Anlagen, die mit dem Stand der Technik übereinstimmen als auch solche, die nicht mit dem Stand der Technik übereinstimmen. Sie beschreibt nur Anlagen, die einen tatsächlichen Verwertungsweg am Markt darstellen. Anlagen, die sich noch im Testbetrieb befinden, werden nicht erfasst. Sortier- und Verwertungsprozesse, die theoretisch möglich sind, aber in der Praxis noch nicht eingesetzt sind (Probetrieb), werden im Zuge der Praxis der SuV nicht ermittelt. Damit relevante Änderungen ermittelt werden können, sollte die Praxis der SuV regelmäßig erfasst werden (Dehoust et al., 2021).

Die Ergebnisse des vorliegenden Berichts dienen als wissenschaftliche Grundlage für die Weiterentwicklung des „Mindeststandards zur Bemessung der Recyclingfähigkeit von systembeteiligungspflichtigen Verpackungen gemäß § 21 Abs. 3 VerpackG“ (ZSVR, 2022). Der Mindeststandard muss unter Berücksichtigung der einzelnen Verwertungswege und Materialarten von der ZSVR (Zentrale Stelle Verpackungsregister) im Einvernehmen mit dem Umweltbundesamt (UBA) jährlich aktualisiert und fortgeschrieben werden (vgl. § 21 Abs. 3 VerpackG). Die im Mindeststandard enthaltenen Kriterien müssen wettbewerbsneutral, objektiv begründbar und fachlich fundiert sein. Grund dafür ist, dass die Angaben im Mindeststandard die Marktchancen von Unternehmen verändern könnten. Fachliche Änderungen im Mindeststandard sollen sich auf die bestehenden Sortier- und Verwertungsinfrastrukturen stützen, die derzeit im industriellen Maßstab bestehen. Die dualen Systeme müssen die Kriterien kennen, um die finanzielle Anreizsetzung über Beteiligungsentgelte festlegen zu können (Dehoust et al., 2021).

Methode zur Ermittlung der Praxis der Sortierung und Verwertung

Der vorliegende Bericht basiert weitestgehend auf dem Teilbericht 1 „Praxis der Sortierung und Verwertung 2020/2021“ (Grummt, 2022; im Folgenden als „Teilbericht 1“ bezeichnet). Der Text wurde größtenteils übernommen und aktualisiert. Des Weiteren wurden die Angaben der Fragebögen aus der letzten Erhebung wiederverwendet und um neue Untersuchungsergebnisse ergänzt.

Der Bericht bildet die Stoffströme von Verpackungsabfall in den Bezugsjahren 2021/2022 auf die verschiedenen Sortier- und Verwertungspfade mengenbezogen ab. Dehoust et al. haben dafür im Bericht UBA-TEXTE 11/2021 eine Methode zur Ermittlung der Praxis der SuV

entwickelt und für das Bezugsjahr 2019 angewandt (Dehoust et al., 2021). Für den vorliegenden Bericht wurde, wie bereits im Teilbericht 1, diese Methode wiederholt genutzt. Im Teilbericht 1 wurden die Bezeichnungen der Kennwerte neu definiert. Die Methode wurde um einen dedizierten Kennwert für transparente PET-Flaschen und sonstige PET-Verpackungen weiterentwickelt. Des Weiteren wurden erstmalig die von den Letztempfängern angegebenen Rezyklatanwendungen mengenbezogen abgebildet. Die generellen Arbeitsschritte zur Durchführung der Methode sind identisch. Unterschiede liegen zum einen in der Berechnung des Anwendungsgrades für die PET-Verpackungen und zum anderen in der Verwendung der Verwertungszuführungsmengen aus dem Mengenstromnachweis (MSN) für das Bezugsjahr 2021. Die Methode ermöglicht die Bemessung der materialgruppenspezifischen Sortier- und Verwertungstechnologien mit einem Kennwert und wahrt gleichzeitig Betriebs- und Geschäftsgeheimnissen der Anlagen. Dabei ist für jede mit Systemmengen belieferte Anlage eine stoffstromspezifische Klassifizierung in Prozessvarianten erforderlich.

In diesem Bericht werden drei verschiedene Bemessungskriterien definiert: Anwendungsgrad der Sortierung $P(A_S)$, Anwendungsgrad der Verwertung $P(A_V)$ und Anwendungsgrad der Sortierung und Verwertung $P(A_{SuV})$. Aus den erhobenen Daten zur Sortierung ergibt sich der Anwendungsgrad der Sortierung $P(A_S)$, welcher die Wahrscheinlichkeit angibt, dass eine Verpackung in einer Sortieranlage für Leichtstoffverpackungen (LVP) auf eine spezifische Sortiertechnik trifft, welche die Verpackung in eine Fraktion sortiert und für eine werkstoffliche Verwertung bereitgestellt. Dabei wird die Annahme getroffen, dass alle Verpackungen in der LVP-Sammelmenge homogen verteilt sind. Analog gibt der Anwendungsgrad der Verwertung $P(A_V)$ die Wahrscheinlichkeit an, dass eine Verpackung einer hochwertigen werkstofflichen Verwertung zugeführt wird (die Sortierung wird dabei ausgeklammert). Daraus resultiert der kombinierte Anwendungsgrad der Sortierung und Verwertung $P(A_{SuV})$, welcher die Wahrscheinlichkeit repräsentiert, mit der eine Verpackung sowohl auf eine spezifische Sortiertechnik trifft, als auch auf einen hochwertigen werkstofflichen Verwertungspfad.

Der vorliegende Bericht gibt einen Überblick über die ermittelte Praxis der SuV deutscher systembeteiligungspflichtiger Verpackungsabfälle. Die Ergebnisse der Anwendung der Erhebungsmethode konnten für 2021/2022 für die Sortierung und Verwertung quantitativ ermittelt werden. Die Praxis wurde über Erhebungen von Sortierern und Verwertern deutscher systembeteiligungspflichtiger Verpackungsabfälle ermittelt. Der erste Teil des Fragebogens konstituiert eine quantitative Studie. Hierbei wurden Sortierer und Verwerter beispielsweise nach aktueller Prozesstechnik befragt. Der zweite Teil stellt eine qualitative Erfassung dar, bei der die Sortierer und Verwerter eine subjektive Einschätzung zu spezifischen Problemen geben konnten. Die Erhebung betrachtet das Recycling von Behälterglas, Papier, Pappe, Kartonagen (PPK) aus dem Blauen System sowie LVP aus dem Gelben System (i. d. R. gelber Sack, gelbe Tonne).

Im vorliegenden Bericht wurden erstmalig auch die PPK-Sortieranlagen sowie die Aluminiumaufbereiter und -verwerter sowie die Weißblechaufbereiter und -verwerter nach Prozesstechniken sowie problematischen Verpackungsmerkmalen mittels Erhebungsbögen befragt.

Ergebnisse und Empfehlungen für den Mindeststandard – Verfügbarkeit von Sortier- und Verwertungsinfrastrukturen

Anhang 1 des Mindeststandards bildet mittels der Kenntnis über die Praxis der SuV die Verfügbarkeit von Sortier- und Verwertungsstrukturen für systembeteiligungspflichtige Verpackungen ab. Die quantitative Studie dieses Berichts erlaubt die Einordnung von Verpackungsabfällen in verschiedene Spalten der Tabelle im Anhang 1 des Mindeststandards.

Durch definierte Schwellenwerte wurde dort die Zuführung zu Sortier- und Verwertungskapazitäten beziffert. Gemäß Mindeststandard 2022 (ZSVR, 2022) kann für Spalte 3A eine Zuführung zu einer hochwertigen werkstofflichen Verwertung vorausgesetzt ($P(A_{\text{SuV}}) \geq 80 \%$), für Spalte 3B nur begrenzt vorausgesetzt ($P(A_{\text{SuV}}) > 20 \%$ und $< 80 \%$) und für Spalte 3C nur im Einzelfall/marginal vorausgesetzt werden ($P(A_{\text{SuV}}) \leq 20 \%$). Für Fraktionsnummern in Spalte 3C ist ein individueller Einzelnachweis zwingend erforderlich. Für Spalte 3B wird ein Einzelnachweis lediglich empfohlen (ZSVR, 2022).

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass die Einstufungen in Anhang 1 des Mindeststandards 2022 unverändert im Mindeststandard 2023 fortgeführt werden können. Es ergeben sich keine Veränderungen der Praxis der SuV, die eine veränderte Einstufung erfordern.

Für Behälterglas beträgt der Anwendungsgrad der Verwertung $P(A_V) = 100 \%$. Bei Behälterglas wird nur $P(A_V)$ erfasst, da für Verpackungen aus diesen Materialien keine Sortierung vorgeschaltet ist. Für PPK ist der Anwendungsgrad der Sortierung und Verwertung $P(A_{\text{SuV}}) = 99 \%$ (dies entspricht Spalte 3A im Anhang 1 des Mindeststandards). Vor der Verwertung von PPK-Verpackungen kann eine PPK-Sortieranlage vorgelagert sein. Im vorliegenden Teilbericht 2 wurde für PPK ein Anwendungsgrad der Sortierung $P(A_S)$ von 100% angenommen. Diese Entscheidung basiert auf der Tatsache, dass einige PPK-Sortieranlagen keine Mengenangaben im Fragebogen machten und einige PPK-Sortieranlagen angaben, PPK lediglich zu verpressen, ohne weitere Angaben zu Menge oder Altpapiersorte zu machen. Für zukünftige Berichte sollte die Datenbasis für PPK-Sortieranlagen verbessert werden. Dennoch gibt Teilbericht 2 einen Überblick über die aktuelle Praxis der PPK-Sortierung.

Der Anwendungsgrad der Sortierung und Verwertung $P(A_{\text{SuV}})$ beträgt für formstabile und halbstarre Kunststoffverpackungen aus PP und HDPE (z. B. Flaschen, Schalen, Becher) über 88% . Die Berechnungen weisen auf einen Verbleib der genannten Verpackungen in Spalte 3A des Mindeststandards hin, da für diese Verpackungen ein hochwertiger werkstofflicher Verwertungspfad gegeben ist. Dies gilt auch für Kunststoffhohlkörper > 5 Liter.

ReCarton gab an, dass über den Jahreswechsel FKN-Mengen energetisch verwertet werden mussten. Grund dafür war die Gaspreiskrise und der Wegfall einer Papierfabrik (Delkeskamp, 2022; EUWID Verpackung, 2023). Gemäß ReCarton bestehe derzeit jedoch wieder eine Verwertungssicherheit für 100% der Mengen. Mittelfristig gebe es in Deutschland wieder Überkapazitäten (E-Mail von ReCarton am 15.03.2023). Wir empfehlen FKN weiterhin Spalte 3A im Anhang 1 des Mindeststandards zuzuordnen. Die Verwertungsvariante, bei der eine hochwertige werkstoffliche Verwertung der FKN-Rejekte stattfindet, wurde (erstmalig im industriellen Maßstab) als Pfad abgebildet. Die Anlage ist im Jahr 2021 in Betrieb gegangen (bvse, 2021; EUWID, 2021). Für das Mahlgut aus den Verschlüssen sowie für das LDPE-Regranulat aus den Folien wurde eine hochwertige werkstoffliche Verwertung bereits als nachgewiesen angesehen (Institut cyclos-HTP GmbH, 2022).

Für Verpackungen aus Aluminium, Aluminiumverbunden, Weißblech und Weißblechverbunden beträgt der Anwendungsgrad der Sortierung $P(A_S) = 100 \%$. Diese Verpackungen sollten weiterhin Spalte 3A zugeordnet werden. Im vorliegenden Teilbericht 2 wurden die Metallaufbereiter und -verwerter erstmalig mittels Erhebungsbogen befragt. Alle befragten Metallrecycler wurden nach Definition des Mindeststandards als Referenzanlagen eingestuft. Eine hochwertige Verwertung wird in allen Fällen vorausgesetzt.

$P(A_{\text{SuV}})$ für Kunststofffolien beträgt knapp über 80% . Wir empfehlen Kunststofffolien weiterhin in Spalte 3A des Mindeststandards zu belassen. Für die kleinformatigen flexiblen Kunststoffverpackungen aus PP lässt sich $P(A_{\text{SuV}})$ auf ca. 32% beziffern. Dabei wurde erstmalig auch die Monofraktion PP-flex einbezogen. $P(A_{\text{SuV}})$ für kleinformatige flexible PE-Verpackungen

beträgt ca. 51 %. Der Anwendungsgrad für die kleinformatischen flexiblen Verpackungen wurde erstmalig jeweils für PE und PP berechnet. Die kleinformatischen flexiblen Verpackungen aus PE und PP sind jeweils Spalte 3B im Anhang 1 des Mindeststandards zuzuordnen.

$P(A_{SuV})$ für formstabile Verpackungen aus PS beträgt ca. 67 % und ist damit gegenüber dem letzten Betrachtungszeitraum um 5 Prozentpunkte angestiegen. PS ist damit weiterhin Spalte 3B des Mindeststandards zuzuordnen.

Im Spätsommer 2022 stellte die Papierfabrik Delkeskamp den Betrieb ein (Delkeskamp, 2022; EUWID Verpackung, 2023). Da es sich bei Delkeskamp um eine der bedeutendsten Papierfabriken für das Recycling von PPK aus LVP handelte, wurde für PPK aus LVP eine Spannweite des $P(A_{SuV})$ berechnet. Wie bereits bei der letzten Erhebung gaben fast alle Sortierer an, diese Fraktion aktuell für ein Recycling bereitzustellen. Die berechnete Spannweite der Fraktion 550 für $P(A_{SuV})$ beträgt 25,5 % – 66,8 %. Bei der unteren Grenze wird angenommen, dass die bisher an Delkeskamp gelieferten Mengen keiner hochwertigen werkstofflichen Verwertung zugeführt werden. Die obere Grenze hingegen berücksichtigt die Annahme, dass die bisher an Delkeskamp gelieferten Mengen einer hochwertigen werkstofflichen Verwertung in anderen Anlagen zugeführt werden. Die gesamte Spannweite deutet auf einen Verbleib von PPK aus LVP in Spalte 3B des Anhang 1 Mindeststandard hin.

PPK aus LVP weist gemäß Anlagenbetreibern einen hohen Verschmutzungsgrad und vermehrt Anteile an Kunststoffen auf, welche ein Recycling erschweren und die Faserausbeute in der Papierfabrik reduzieren können. Verwerter gaben zudem an, dass PPK aus LVP oftmals bessere Papierqualitäten zur Qualitätssteigerung beigemischt werden (sogenannte „Rezeptur“). Problematisch seien insbesondere Füllgutreste von Lebensmitteln, welche Geruchsbildung sowie Schimmel- oder Schädlingsbefall an den Verpackungen hervorrufen können. Die Entsorgung über das gelbe System führt zudem dazu, dass die Fraktion einen hohen Wassergehalt aufweist. Aufgrund der genannten Probleme sind die Ballen nur eine begrenzte Zeit lagerbar. Problematisch kann auch die Aufbereitung des Prozesswassers sein, denn diese muss so ausgestattet sein, dass die organischen Anteile der Fraktion PPK aus LVP ausreichend abgereinigt werden können. Zudem sind Papierfabriken, die Lebensmittelverpackungen produzieren, gemäß der 36. Empfehlung des Bundesinstituts für Risikobewertung ausgeschlossen, wenn „PPK aus Gesamtmüll-Sortieranlagen und aus der Mehrkomponenten-Erfassung“ verwendet werden (BfR, 2023).

Im Konsultationsentwurf des Mindeststandards 2023 ist ein Einzelnachweis für faserbasierte Verbundverpackungen und PPK-Verpackungen mit nicht-trockenen Füllgütern (außer FKN) vorgesehen (ZSVR, 2023a). Die Zugabe von z. B. Nassfestmitteln oder Beschichtungen (insbesondere beidseitig) zur Gewährleistung des Produktschutzes kann die Zerfaserung der Verpackungen und damit das Recycling behindern (Gürlich et al., 2022). Papierfabriken gaben an, dass sich restentleerte faserbasierte Verbundverpackungen für trockene Füllgüter (z. B. Beutel für Mehl und Zucker) in der Regel besser recyceln lassen. Diese werden häufig durch Verbraucher*innen nicht als Verbundverpackung erkannt und intuitiv in der blauen Tonne entsorgt. Es bedarf einer Weiterentwicklung der Methode, um die Praxis der Verwertung für diese Fraktion besser abzubilden und die genannten Kriterien zu berücksichtigen. Wir empfehlen die Thematik in der kommenden EK III-Runde erneut aufzugreifen und zu diskutieren.

Für transparente PET-Flaschen sowie sonstige formstabile PET-Verpackungen erweiterte der Teilbericht 1 die Erhebungsmethode und bestimmt eine Spannweite zwischen Worst Case und Best Case der Verpackungsanteile in den PET-Fractionen 325 und 328-(1-6). Für transparente PET-Flaschen beträgt die Spannweite 81,8 % – 85,2 %. Gegenüber Teilbericht 1 konnte für die

PET-Fractionen die Datenbasis verbessert werden. Wir empfehlen, transparente PET-Flaschen im kommenden Mindeststandard 2023 weiterhin in Spalte 3A aufzulisten. Die Fraktionen 328-5 und 328-6 („PET-Schalen“) werden für die Spannweite der PET-Flaschen nicht miteinbezogen, da die beiden Fraktionen nicht auf PET-Flaschen abzielen. Dies wurde im vorliegenden Teilbericht 2 gegenüber Teilbericht 1 angepasst.

Für sonstige formstabile PET-Verpackungen wurde eine Spannweite von 1,1 % – 30,1 % bestimmt. Die Unter- und Obergrenze (Worst Case und Best Case) entspricht dem Minimum und Maximum aller Kombinationen an sonstigen PET-Verpackungsanteilen in den folgenden Fraktionen: 328-(0-6). Ein Anwendungsgrad von 1,1 % ergibt sich nur, wenn sonstige PET-Verpackungen ausschließlich über die Fraktionen 328-5 und 328-6 („PET-Schalen“) hochwertig werkstofflich verwertet werden können. Aufgrund der folgenden Einschränkungen empfehlen wir, sonstige PET-Verpackungen weiterhin in Spalte 3C zu belassen:

- Der Best Case von 34,8 % ist nur erreichbar in einer speziellen Kombination von Anteilen an sonstigen PET-Verpackungen in den PET-Fractionen 328-(0-6). Alle anderen Kombinationen liegen unterhalb dieser Prozentzahl.
- Einige Sortieranlagen gaben an, dass die Fraktion 328-5 von Verwertungsanlagen teils werkstofflich und teils energetisch verwertet wird. Diese Anlagen wurden aufgrund des Anteils an hochwertiger werkstofflicher Verwertung trotzdem gezählt und einberechnet (Zahlen für die Teilmengen innerhalb der Anlagen lagen nicht vor).
- Die Obergrenze der genannten Spannweite setzt voraus, dass sowohl Mono- als auch Multilayer-Schalen einberechnet werden. Die Einbeziehung von Multilayer-Schalen ist unplausibel, denn einige PET-Verwerter gaben an, Multilayer-PET-Schalen vorab auszusortieren (Zahlen für die Teilmengen innerhalb der Anlagen lagen nicht vor).

Diese, in dieser Studie nicht genau quantifizierbaren, Faktoren führen nach unserer Einschätzung dazu, dass der tatsächliche Anwendungsgrad deutlich unter dem für die Einstufung im Anhang 1 des Mindeststandards relevanten Grenzwert von 20 % liegen wird. Uns sind aktuelle Bestrebungen bekannt, die Kapazitäten für ein hochwertiges werkstoffliches Recycling von PET-Schalen auszubauen (E-Mail von Hr. Dr. Christiani am 25.04.2023). Wir empfehlen die aktuellen Entwicklungen in diesem Bereich weiterhin zu beobachten.

Für Verpackungen aus EPS besteht kein hochwertiger Verwertungspfad, wenn sie über die LVP-Sammlung (gelber Sack, gelbe Tonne) erfasst werden. $P(A_S)$ für EPS beträgt 0 % und somit ist auch $P(A_{SuV})$ 0 %. Damit sollte EPS weiterhin in Spalte 3C im Mindeststandard eingeordnet werden. Aktuell laufen Pilotprojekte zur Sortierung und Bereitstellung von EPS in LVP-Sortieranlagen als Monofraktion. Bei Einbeziehung dieser Pilotprojekte beläuft sich $P(A_S)$ in 2022 auf < 5 %. EPS wird aktuell nicht über die LVP-Sortierung im industriellen Maßstab sortiert und verwertet. Es landet im Sortierrest und wird anschließend energetisch verwertet. Für EPS, welches separat und sortenrein über z. B. Wertstoffhöfe oder industrielle und gewerbliche Sammlungen gesammelt wird, besteht ein Recyclingpfad (Lindner et al., 2019).

Für Verpackungen aus anderen, zuvor nicht genannten Kunststoffen wie PC, PVC, PA, PLA, Duroplaste, Elastomere und kompostierbaren Kunststoffen sowie Keramik und Naturmaterialien wie Holz, Kork bestehen derzeit keine hochwertigen werkstofflichen Verwertungspfade über die LVP-Sammlung.

Ergebnisse und Empfehlungen für den Mindeststandard – Stand der Technik

Aufgrund hoher Standardisierung existieren generell nur wenige Pfadverzweigungen bei der Verwertung der eben genannten Verpackungen mit hochwertigen werkstofflichen Verwertungspfaden. Der Bericht zeigt auch Änderungen in der Prozesstechnik auf und verweist auf innovative technische Potenziale beim Recycling. Zu nennen ist hierbei insbesondere der Einsatz von NIR-Technik in Glasaufbereitungsanlagen als neuer Trend in der Glasaufbereitung. Diese Technik erlaubt die Identifizierung und Abscheidung von Kunststoffkomponenten und stellt den Stand der Technik dar. Ein Glasaufbereiter gab an, dass diese Technik besonders hilfreich für die Identifizierung von transparenten Ausgussensätzen aus Kunststoff sei. Diese können aufgrund der Transparenz nicht mittels Durchlichttechnik im KSP-Trenner (KSP steht für Keramik, Steine und Porzellan) abgetrennt werden. Ebenso werden an Glasscherben anhaftende Etiketten detektiert, sodass das Etikett in einer Nachstufe durch mechanische Etikettenentfernung von der Glasscherbe abgerieben werden kann. Die Technik ermöglicht ebenso die Detektion und den Auswurf kunststoffhaltiger Fehlwürfe, wie Glas aus PMMA (Acrylglas) und Polycarbonat. Bisher verwenden nur wenige Anlagen diese Technik, weshalb sie noch keine generelle Praxis darstellt. Aufbereiter trafen die Aussage, dass NIR-Trenner in der Glasaufbereitungstechnik in den folgenden Jahren an Bedeutung gewinnen werden.

Im Hinblick auf die Unterschiede bei der LVP-Sortierung existieren gegenüber der Befragung für 2019 durch Dehoust et al. wie bereits im Teilbericht 1 keine Anlagen mehr ohne Feinkornabsiebung. Im Vergleich zum letzten Betrachtungszeitraum wurde eine leichte Zunahme der Feinkornabsiebung bei ≤ 20 mm festgestellt. Im Teilbericht 1 wurden die Varianten ≤ 20 mm und 30 mm zusammengefasst und beide wie bereits im Bericht von Dehoust et al. als Stand der Technik bewertet. Im vorliegenden Bericht wurde allein die Variante ≤ 20 mm als Stand der Technik eingestuft (Gespräch mit Hr. Dr. Christiani am 22.03.2023). Die Feinkornabsiebung erfolgt bei dieser Variante i. d. R. über ein Schwingsieb mit Langlochmasche. Bei dieser Variante sind auch kleine Verpackungen sortierfähig und es besteht die Chance auf eine hochwertige werkstoffliche Verwertung.

Ein weiteres Ergebnis der Befragung der LVP-Sortierer (ohne Verwertung) ist, dass gegenüber den letzten drei Jahren in der aktuellen Auswertung ein stetiger Anstieg vom $P(A_5)$ der Fraktion PO-flex ersichtlich ist. Gegenüber 2019 beträgt der Anstieg von $P(A_5)$ ca. 17 Prozentpunkte, gegenüber 2021 war ein Anstieg von ca. 3 Prozentpunkten zu verzeichnen. Eine mögliche Ursache liegt darin, dass die Fraktion neu ist und sich erst als Alternative zur Fraktion Mischkunststoffe etablieren musste. Weiterhin besitzen, wie in den letzten Jahren, nur wenige LVP-Sortieranlagen die Prozesstechnik, um schwarze (rußbasiert gefärbte) Kunststoffe als Monofraktion separieren zu können.

Der Waschprozess bei der Kunststoffverwertung ermöglicht eine Entfernung von Klebstoffresten, Anhaftungen und Etiketten. Bei den PET-Verwertern ist eine Heißwäsche weiterhin generelle Praxis. Bei den anderen befragten Verwertungsanlagen wird die Wäsche in den Jahren 2020/2021 überwiegend als Kaltwäsche ausgeführt. Mittlerweile gibt es jedoch auch vereinzelt andere Kunststoff-Verwerter (z. B. PE- und PP-Recycler), die das Mahlgut heiß waschen. Eine Heißwäsche wird zur intensiven Reinigung der Mahlgutoberfläche von z. B. Fetten und Etiketten und zur Geruchsminderung durchgeführt. Um eine bessere Reinigungsleistung zu erzielen, wird dabei das Waschwasser auf eine bestimmte Temperatur erhitzt und ggf. Detergenzien zugegeben. Eine Heißwäsche kann die Qualität der Rezyklate verbessern und das Einsatzspektrum erweitern (Knappe et al., 2021). Die Washtemperatur beim Kunststoffrecycling sollte in kommenden Erhebungen weiterhin abgefragt und beobachtet werden.

Ergebnisse und Empfehlungen für den Mindeststandard – Problematische Verpackungsmerkmale bei der Sortierung und Verwertung

Die letzten zwei Erhebungen boten den Sortierern und Verwertern die Möglichkeit, eine Einschätzung zur Relevanz problematischer Verpackungen und Komponenten zu geben, welche spezifische Probleme im Prozess verursachen können. Als Erkenntnis aus der Befragung ist festzustellen, dass die Sortierer und Verwerter überwiegend die im Anhang 2 und Anhang 3 des Mindeststandards angegebenen Verpackungsmerkmale und Recyclingunverträglichkeiten teilten. Die Sortierer und Verwerter hatten zusätzlich die Möglichkeit, weitere Angaben zu kritischen Verpackungen und Komponenten zu machen, die bei der Trennung, Sortierung und Verwertung zu Problemen führen können. Beispielsweise sahen LVP-Sortierer bei der aktuellen Erhebung „Lichtschutz-Sleeves (innen schwarz)“ und Aluminiumverwerter „Nicht restentleerte Spraydosen (Deo, Haarspray etc.)“ als problematisch an.

Rezyklatanwendungen

Erstmalig stellt der vorliegende Bericht auch die Rezyklatanwendung der Letztempfängeranlagen mengenbasiert dar. Die Rezyklatanwendungen geben einen Hinweis auf die Hochwertigkeit der Verwertung i. S. d. Mindeststandards. Die Ergebnisse zeigen, dass beispielsweise aus PS- und PP-Verpackungen hauptsächlich Spritzgussanwendungen hergestellt werden. Aus Kunststofffolien werden überwiegend Spritzgussanwendungen, Extrusionsfolien/Thermoforms, aber auch Blasfolien hergestellt. Rezyklate aus PET-Verpackungen werden größtenteils in PET-Folien, Polyesterfasern, aber auch als Umreifungsbänder eingesetzt.

Die Metallverwerter gaben verschiedene Rezyklatanwendungen an. So nannten die Aluminiumaufbereiter und -verwerter beispielsweise den Einsatz in Automobilindustrie, Verpackungen (z. B. Dosen), Aluminium-Gieß und -Granulat, z. B. als Einsatzmaterial für Sekundärschmelzwerke, Feuerwerkskörper oder in Katalysatoren.

Alle eben genannten Rezyklatanwendungen sind i. S. d. Mindeststandards als Referenzprozesse (hochwertig werkstoffliche Verwertung) einzuordnen, da Neumaterial in werkstofftypischen Anwendungen ersetzt wird. Keine Referenzprozesse stellen beispielsweise der Einsatz von Papierfasern in Dämmstoffprodukten oder im Straßenbau dar. Weiterhin werden Kunststoffverwertungsanlagen, die Intrusionsprodukte als Rezyklatanwendung nannten, welche Holz oder Beton ersetzen (z. B. Palisaden, Zäune, Parkbänke etc.), als nicht hochwertig werkstofflich i. S. d. Mindeststandards angesehen.

Fazit

Die in 2021/2022 bestehenden technischen Möglichkeiten bei der Sortierung und Verwertung deutscher Verpackungsabfälle sind noch nicht in vollem Umfang ausgeschöpft. Mit bestehenden Prozesstechniken gelingt bereits ein hochwertiges werkstoffliches Recycling. Es besteht jedoch noch Optimierungspotential. Teilweise existiert eine Diskrepanz zwischen Stand der Technik und der aktuellen Praxis. Der vorliegende Bericht identifiziert neue technische Ansätze, wie Heißwäsche im Kunststoffrecycling oder NIR-Technik in Glasaufbereitungsanlagen. Diese können eine verbesserte Recyclingfähigkeit von Verpackungen ermöglichen.

Der Bericht diskutiert die von den Sortierern und Verwertern angegebenen Probleme und spricht Empfehlungen zur Berücksichtigung der Praxis der Sortierung und Verwertung im Mindeststandard aus (Kapitel 3 und Kapitel 4).

Summary

Section 21 of the Packaging Act (VerpackG) obliges the so-called dual systems to create financial incentives within the framework of participation fees in order to promote highly recyclable packaging. This should reduce negative environmental impacts of packaging waste and promote high-quality mechanical recycling. According to the Packaging Act, the determination of the recyclability of packaging must be based on the current practice of sorting and recovery of packaging that is subject to system participation.

The draft of the future EU Packaging Regulation also requires financial rewards for highly recyclable packaging (eco-modulation of fees). According to the draft, all packaging should be economically reusable or recyclable by 2030 (with exemptions for very few packaging applications). Full industrial recyclability of all packaging is planned by 2035.

Explanation of the term "practice of sorting and recovery"

The "practice of sorting and recovery" (practice of SaR) describes the sorting and recovery infrastructure that German packaging waste encounters given its proper disposal. It covers both, facilities in Germany and abroad. The prerequisite is that the facilities are verifiably supplied with packaging waste from the German dual systems. The practice of SaR includes both, plants that correspond to the state of the art as well as those that do not correspond to the state of the art. It only describes plants that represent an actual recovery route in the market. Plants that are still in operation testing mode are not included. Sorting and recovery processes that are theoretically possible but not yet used in practice (trial operation) are not identified in the course of the practice of SaR. In order for relevant changes to be identified, the practice of SaR should be recorded regularly (Dehoust et al., 2021).

The results of the present report at hand serve as a scientific basis for the further development of the "Minimum Standard for determining the recyclability of packaging subject to system participation pursuant to Section 21 (3) VerpackG" (German Packaging Act) (ZSVR, 2022). The Minimum Standard must be updated and further developed annually by the Stiftung Zentrale Stelle Verpackungsregister (Foundation Central Agency Packaging Register – ZSVR) in agreement with the Umweltbundesamt (German Environment Agency – UBA), taking into account the individual recovery routes and material types (cf. Section 21 (3) of the VerpackG). The criteria contained in the Minimum Standard must be competitively neutral, objectively justifiable and technically sound. This is due to the fact that the information in the Minimum Standard could change the market opportunities of companies. Technical changes in the Minimum Standard should be based on the sorting and recovery infrastructures currently existing at industrial scale. The dual systems need to know the criteria in order to be able to determine the financial incentives to be set by means of the participation fees (Dehoust et al., 2021).

Method for determining the practice of sorting and recovery

This report is largely based on the first sub-report "Praxis der Sortierung und Verwertung 2020/2021" (Grummt, 2022; hereafter "sub-report 1"). The text was largely adopted and updated. Furthermore, the information from the questionnaires from the last survey was reused and supplemented by new survey results.

The report maps the quantity flows of the various sorting and recovery paths of packaging waste in the reference years 2021/2022 on a quantity basis. For this purpose, Dehoust et al. developed a method for determining the practice of SaR in the report UBA-TEXTE 11/2021 and applied it to the reference year 2019 (Dehoust et al., 2021). The report at hand, as sub-report 1, adapts this method. In sub-report 1, the designations of the characteristic values were redefined. The

method was improved to include a dedicated characteristic value for transparent PET bottles and other PET packaging. Furthermore, the applications of the recycled materials were mapped in terms of quantity for the first time, as indicated by the final recipients of the recycled materials. The general steps for carrying out the method are remaining the same.

Differences compared to the original method are, on the one hand, included in the calculation of the application rate for PET packaging and, on the other hand, in the use of the recovery feed quantities from the mass flow certificate for the reference year 2021. This method allows for the assessment of group-specific material sorting and recovery technologies with one characteristic value. At the same time, this method preserves legally protected operational and business secrets of the plants. This requires a material stream-specific classification into process variants for each plant supplied with system quantities.

This report defines three different determination criteria: application degree of sorting $P(A_S)$, application degree of recovery $P(A_V)$, and application degree of sorting and recovery $P(A_{SuV})$. From the data collected from the sorting centers, the application degree of sorting $P(A_S)$ is obtained. It represents the probability that a packaging encounters a specific sorting technology at a sorting plant for lightweight packaging, that sorts the packaging into a fraction enabling mechanical recovery. The assumption is made that all packaging is homogeneously distributed in the lightweight packaging collection volume. Similarly, the application degree of recovery $P(A_V)$ indicates the probability that a packaging is undergoing a high-quality mechanical recovery (sorting is excluded). Combined, this results in the application degree of sorting and recovery $P(A_{SuV})$, which represents the probability of a packaging encountering both a specific sorting technique and a high-quality mechanical recycling path.

This report provides an overview of the determined practice of SaR of German packaging waste subject to system participation. The results of the implementation of the survey method could be determined quantitatively for 2021/2022 for sorting and recovery. The practice was determined on the basis of surveys of sorters and recyclers of German packaging waste subject to system participation. The first part of the survey constitutes a quantitative study. Here, sorters and recyclers were asked, for example, about current process technology. The second part is a qualitative survey in which sorters and recyclers were able to give a subjective assessment of specific problems. The survey concentrates on the recycling of container glass, paper, paper board and cardboard packaging from the blue system (PPC) as well as lightweight packaging from the yellow system (yellow bag, yellow garbage bin).

In this report, the PPC sorting plants as well as the aluminium and tinplate reproprocessors and recyclers were surveyed for the first time about process technologies and problematic packaging characteristics by means of questionnaires.

Results and recommendations for the Minimum Standard – Availability of sorting and recycling infrastructure

Annex 1 of the Minimum Standard maps the availability of sorting and recovery infrastructure for packaging subject to system participation by means of the knowledge of the practice of the SaR. The quantitative study of this report allows the classification of packaging waste into different columns of the table in Annex 1 of the Minimum Standard. Defined threshold values were used there to quantify the supply to sorting and recycling capacities. According to the Minimum Standard 2022 (ZSVR, 2022), for column 3A an input to high-quality mechanical recycling can be assumed ($P(A_{SuV}) \geq 80 \%$), for column 3B high-quality mechanical recycling takes place only to a limited extent ($P(A_{SuV}) > 20 \%$ and $< 80 \%$) and for column 3C only in individual cases/marginal ($P(A_{SuV}) \leq 20 \%$). For fraction numbers in column 3C, individual

evidence must be provided. For column 3B, individual evidence is only recommended. (ZSVR, 2022)

In summary, the classifications in Annex 1 of the Minimum Standard 2021 can be kept unchanged in the Minimum Standard 2022. There are no changes in the practice of the SaR that require a change in classification.

For container glass, the application degree of recovery $P(A_V)$ is 100 %. For container glass, only $P(A_V)$ is recorded, since no sorting is taking place upstream for packaging made of these materials. For PPC, the application degree of sorting and recovery $P(A_{SuV})$ is 99 % (this corresponds to column 3A in Annex 1 of the Minimum Standard). A PPC sorting plant may be upstream of the recovery of PPC packaging. In the report at hand, an application degree of sorting $P(A_S)$ of 100 % was assumed for PPC. This decision is based on the fact that some PPC sorting plants did not provide any quantity information in the questionnaire and some PPC sorting facilities stated that they only pressed PPC without providing any further information on the quantity or recovered paper type. For future reports, the data basis for PPC sorting plants should be improved. Nevertheless, sub-report 2 gives an overview of the current practice of PPC sorting.

The application degree of sorting and recovery $P(A_{SuV})$ is over 88 % for dimensionally stable plastic packaging made of PP and HDPE (e.g. bottles, trays, cups). The calculations indicate a retention that the above-mentioned packaging in column 3A of the Minimum Standard, as a high-quality mechanical recycling path exists for this packaging. This also applies to plastic hollow bodies > 5 litres.

ReCarton stated that over the turn of the year, FKN quantities had to be energetically recovered. The gas price crisis and the loss of a paper mill (Delkeskamp, 2022; EUWID Verpackung, 2023) was the reason for this. According to ReCarton, however, 100 % of the quantities can currently be recycled again. In the medium term, there will be overcapacities in Germany again (e-mail from ReCarton on 15/03/2023). We recommend to continue to assign FKN to column 3A in Annex 1 of the Minimum Standard. The recycling variant, in which high-quality mechanical recycling of the FKN projects takes place, was mapped as a path (for the first time at an industrial scale). The plant went into operation in 2021 (bvse, 2021; EUWID, 2021). For the regrind from the closures and for the LDPE regranulate from the films, high-quality mechanical recycling has already been considered proven (Institut cyclos-HTP GmbH, 2022).

For packaging made of aluminium, aluminium composites, tinplate and tinplate composites, the application degree of sorting $P(A_S)$ is 100 %. This packaging should continue to be assigned to column 3A. In this report at hand, the metal recyclers and reproducers were surveyed for the first time. All surveyed metal recyclers were classified as reference facilities according to the definition of the Minimum Standard. High-quality recycling is assumed in all cases.

The application degree of sorting and recovery $P(A_{SuV})$ for plastic films is just over 80 %. We recommend leaving plastic films in column 3A of the Minimum Standard. For small-format flexible plastic packaging made of PP, $P(A_{SuV})$ can be estimated at approximately 32 %. For flexible PP packaging, the mono fraction PP-flex was included for the first time. $P(A_{SuV})$ for small-format flexible packaging made of PE is approximately 51 %. The application degree for small-format flexible packaging was calculated for the first time for PE and PP. The small-format flexible packaging made of PE and PP are each to be assigned to column 3B in Annex 1 of the Minimum Standard.

$P(A_{\text{SuV}})$ for dimensionally stable packaging made of PS is approximately 67 %, a decrease of 5 percentage points compared to the last period. PS is thus still to be assigned to column 3B of the Minimum Standard.

In late summer 2022, the Delkeskamp paper mill ceased operations (Delkeskamp, 2022; EUWID Verpackung, 2023). As Delkeskamp was one of the most important paper mills for recycling PPC from lightweight packaging, a range of the $P(A_{\text{SuV}})$ for PPC from lightweight packaging was calculated. As in the last survey, almost all sorters stated that they currently provide this fraction for recycling. The calculated range of fraction 550 for $P(A_{\text{SuV}})$ is 25.5 % - 66.8 %. The lower limit assumes that the quantities formerly delivered to Delkeskamp have, by the time of the survey, not been fed into high-quality mechanical recycling anymore. The upper limit, on the other hand, considers the assumption that the quantities formerly delivered to Delkeskamp have been fed into high-quality mechanical recycling in other plants. The total range indicates that PPC from lightweight packaging remains in column 3B of Annex 1 Minimum Standard.

According to plant operators, PPC from lightweight packaging has a high degree of contamination and an increased proportion of plastics, which makes recycling more difficult and can reduce the fiber yield in the paper mill. Recyclers also stated that PPC from lightweight packaging is often mixed with better paper qualities to improve quality (so-called "recipe"). In particular, food product residues, which can cause odor formation and mold or pest infestation on the packaging, are problematic. Disposal via the yellow system also leads to the fraction having a high water content. Due to the problems mentioned, the bales can only be stored for a limited amount of time. The treatment of the process water can also be problematic, because it must be equipped in such a way that the organic components of the PPC from lightweight packaging can be sufficiently purified. In addition, paper mills producing food packaging are excluded according to the 36th recommendation of the Federal Institute for Risk Assessment if "PPC from total waste sorting plants and from multi-component collection" are used (BfR, 2023).

According to the consultation draft of the Minimum Standard 2023, an individual evidence is to be provided for fiber-based composite packaging and PPC packaging with non-dry products (except FKN) (ZSVR, 2023a). The addition of, for example, wet strength agents or coatings (especially on both sides) to ensure product protection can hinder the defibration of the packaging and the recycling (Gürlich et al., 2022). Paper mills indicated that residue-emptied fiber-based composite packaging for dry contents (e.g., bags for flour and sugar,) is generally easier to recycle. Consumers often do not recognize these as composite packaging and intuitively dispose of them in the blue garbage bin. Further development of the method is needed to better reflect the practice of recycling of this fraction and to consider the criteria mentioned. We recommend that the topic be taken up and discussed again in the upcoming EK III round.

For transparent PET bottles as well as other dimensionally stable PET packaging, sub-report 1 expanded the survey method and determines a range between worst case and best case of the packaging shares in PET fractions 325 and 328-(1-6). For transparent PET bottles, the range is 81.8% - 85.2%. Compared to sub-report 1, the data basis for the PET fractions could be improved. We recommend that transparent PET bottles continue to be listed in column 3A in the upcoming Minimum Standard 2023. The fractions 328-5 and 328-6 ("PET trays") are not included for the range of PET bottles, as the two fractions do not target PET bottles. This has been adjusted in the present report compared to sub-report 1.

For other dimensionally stable PET packaging, a range of 1.1 % - 30.1 % was determined. The lower and upper limits (worst case and best case) correspond to the minimum and maximum of all combinations of other PET packaging shares in the following fractions: 328-(0-6). An application level of 1.1% only results if other PET packaging can be recycled to a high quality

exclusively via fractions 328-5 and 328-6 ("PET trays"). Due to the following restrictions, we recommend to continue to keep other PET packaging in column 3C:

- ▶ The best case of 34.8% is only achievable in a specific combination of shares of other PET packaging in PET fractions 328-(0-6). All other combinations are below this percentage.
- ▶ Some sorting facilities indicated that fraction 328-5 is recycled partly for mechanical recovery and partly for energy recovery. These facilities were counted and included anyway because of the percentage of high-value mechanical recovery (figures for the fractions within the plants were not available).
- ▶ The upper limit of the above-mentioned range assumes that both monolayer and multilayer shells are included. The inclusion of multilayer trays is implausible, as some PET recyclers stated that they sort out multilayer PET trays in advance (figures for the partial quantities within the plants were not available).

In our estimation, these factors, which cannot be quantified precisely in this study, mean that the actual utilization rate will be well below the 20 % threshold relevant for classification in Annex 1 of the Minimum Standard. We are aware of current efforts to expand capacities for high-quality mechanical recycling of PET trays. We recommend continuing to monitor current developments in this field.

There is no high-quality recovery path for EPS packaging if it is collected via the lightweight packaging collection (yellow bag, yellow bin). $P(A_S)$ for EPS is 0 % and therefore $P(A_{SuV})$ is also 0 %. EPS should thus continue to be classified in column 3C in the Minimum Standard. Currently, there are pilot projects for sorting out EPS as a mono-fraction in sorting centers. If these pilot projects are included, $P(A_S)$ would be < 5 % in 2022. EPS is currently not sorted and recycled at an industrial scale via the lightweight packaging collection. It ends up in the sorting residue. There is only a recycling path for EPS, which is collected separately and unmixed via industrial and commercial collections (Lindner et al., 2019).

For packaging made of other plastics not mentioned above, such as PC, PVC, PA, PLA, thermosets, elastomers and compostable plastics, as well as ceramics and natural materials such as wood and cork, there are currently no high-quality mechanical recycling paths via the lightweight packaging collection.

Results and recommendations for the Minimum Standard - State of the art

Due to a high degree of standardization, there are generally only a few path branches in the recovery of the packaging just mentioned with high-quality mechanical recycling paths. The report also shows changes in process technology and refers to innovative technical potentials in recycling. Of particular note is the use of NIR technology in glass processing plants as a new trend in glass processing. This technology allows for the identification and separation of plastic components and represents the state of the art. One glass recycler stated that this technique is particularly helpful for the identification of transparent plastic pouring inserts. Due to their transparency, these cannot be separated using transmitted light technology in the CSP separator (CSP stands for ceramics, stones and porcelain). Furthermore, labels adhering to glass cullet can be detected so that the label can be rubbed off the glass cullet in a downstream stage by mechanical label removal. The technology also enables the detection and ejection of plastic-containing reject glass, such as glass made of PMMA (acrylic glass) and polycarbonate. So far, only a few plants use this technology, so it is not yet a general practice. Glass recyclers made the statement that NIR separators will gain importance in glass processing technology in the years ahead.

With regard to the differences in lightweight packaging sorting, compared to the survey for 2019 by Dehoust et al., there are no longer any sorting centers without fine grain screening, as was already the case in sub-report 1. Compared to the last period under consideration, a slight increase in fine screening was observed at ≤ 20 mm. In sub-report 1, the variants ≤ 20 mm and 30 mm were combined and both were assessed as state of the art, as already in the report by Dehoust et al. In the report at hand, only the ≤ 20 mm variant was classified as state of the art (exchange with Mr. Dr. Christiani on the 22/03/2023). In this variant, fine grain screening is usually carried out using a vibrating screen with a slotted mesh. With this variant, even small packaging can be sorted and there is a chance of high-quality material recycling.

Another result of the survey of the lightweight packaging sorters (without recycling) is that, compared to the last three years, a steady increase in the $P(A_S)$ of the PO-flex fraction is evident in the current evaluation. Compared to 2019, the increase of $P(A_S)$ is approximately 17 percentage points, and compared to 2021, there was an increase of approximately 3 percentage points. One possible reason is that the fraction is new and first had to establish itself as an alternative to the mixed plastics fraction. Furthermore, as in recent years, only a few sorting centers have the process technology to be able to separate black (soot-based colored) plastics as a mono fraction.

The washing process in plastic recycling enables the removal of adhesive residues, adhesions and labels. For PET recyclers, hot washing is still the general practice. At the other recycling plants surveyed, washing was predominantly carried out as cold washing in 2020/2021. In the meantime, however, there are also a few other plastics recyclers (e.g. PE and PP recyclers) that use hot washing. Hot washing is performed for intensive cleaning of the regrind surface from e.g. fats and labels and for odor reduction. To achieve a better cleaning performance, the washing water is heated up to a certain temperature and detergents are added if necessary. Hot washing can improve the quality of the recyclates and expand the range of applications (Knappe et al., 2021). The washing temperature in plastics recycling should continue to be queried and monitored in upcoming surveys.

Results and recommendations for the Minimum Standard – Problematic packaging characteristics during sorting and recycling

The last two surveys offered an opportunity for the sorters and recyclers to provide an assessment of the relevance of problematic packaging and components that may cause specific problems in the process. As a finding from the survey, the sorters and recyclers predominantly corroborated the packaging characteristics and recycling incompatibilities indicated in Annex 2 and Annex 3 of the Minimum Standard. In addition, the sorters and recyclers had the opportunity to provide further information on critical packaging and components that may cause problems during separation, sorting and recovery. For example, in the current survey, lightweight packaging sorters regarded "light protection sleeves (black inside)" and aluminium recyclers regarded "spray cans (deodorant, hair spray, etc.) that have not been emptied of residues" as problematic.

Recyclate applications

For the first time, this report also presents the recyclate applications of the last-recipient plants on a quantity basis. The recyclate applications give an indication of the high quality of the recovery in the context of the Minimum Standard. The results show that, for example, mainly injection molding applications are produced from PS and PP packaging. Plastic films are mainly used for injection molding applications, extrusion films/thermoforms, but also blown films. Recyclates from PET packaging are mostly used in PET films, polyester fibers, but also strapping.

The metal recyclers indicated different recyclate applications. For example, the aluminium reproprocessors and recyclers mentioned the use in the automotive industry, packaging (e.g. cans), aluminium grit and granules, e.g. as feedstock for secondary smelters, fireworks or catalytic converters.

All of the above-mentioned recyclate applications are to be classified as reference processes (high-quality mechanical recycling) in the context of the Minimum Standard, since virgin material is replaced in applications typical for that material. Reference processes do not include, for example, the use of paper fibres in insulation products or in road construction. Furthermore, plastics recycling plants that named intrusion products as recyclate applications that replace wood or concrete (e.g. palisades, fences, park benches, etc.) are not considered to be high-quality mechanical recycling in the context of the Minimum Standard.

Conclusion

The technical options existing in 2021/2022 for sorting and recovering German packaging waste have not yet been fully exploited. Existing process technologies already achieve high-quality mechanical recycling. However, there is still potential for optimization. In some cases, the state of the art differs from the state of practice. This report identifies new technical approaches, such as hot washing in plastics recycling or NIR technology in glass processing plants. These can allow for improved recyclability of packaging.

The report discusses the problems indicated by sorters and recyclers and makes recommendations for taking the practice of sorting and recovery into account in the Minimum Standard (Chapter 3 and Chapter 4).

1 Einleitung

Am 30. November 2022 veröffentlichte die Europäische Kommission einen Entwurf für eine Verordnung über Verpackungen und Verpackungsabfälle COM(2022) 677 final (European Commission, 2022a). Die neue Verordnung soll die bisherige Richtlinie über Verpackungen und Verpackungsabfälle ablösen. Die EU-VerpackVO hat das Ziel, eine EU-weite Harmonisierung der Vorschriften für Verpackungen und Verpackungsabfälle zu schaffen.

Der vorliegende Entwurf zielt darauf ab, dass alle Verpackungen bis 2030 wirtschaftlich wiederverwendbar oder recycelbar sein sollen. Eine industrielle Recyclingfähigkeit aller Verpackungen ist erst ab 2035 vorgesehen. Die Kriterien zur Bewertung der Recyclingfähigkeit und zum Design-for-Recycling sollen erst in einem "delegierten Rechtsakt" der EU-Kommission festgelegt werden. Beteiligungsentgelte sollen anhand der Recyclingfähigkeit der Verpackungen bemessen werden, obwohl die Kriterien hierfür ebenfalls noch in einem delegierten Rechtsakt definiert werden sollen.

Auf nationaler Ebene verpflichtet das Verpackungsgesetz (VerpackG) bereits seit 2019 die dualen Systeme gemäß § 21, ein recyclinggerechtes Verpackungsdesign über finanzielle Anreize zu fördern. Ziel ist es, ein hochwertiges Recycling zu stärken, um negative Umweltauswirkungen von Verpackungsabfällen sowie den Einsatz von Rohstoffen zu reduzieren. Nicht hochgradig recyclingfähige Verpackungen sollen prinzipiell mit höheren Beteiligungsentgelten als gut recyclingfähige Verpackungen belegt werden. Zur Ermittlung der Recyclingfähigkeit muss die Praxis der Sortierung und Verwertung (§ 21 Abs. 1 Nr. 1 VerpackG) berücksichtigt werden. Das bedeutet, dass sich die dualen Systeme zur Bemessung der Beteiligungsentgelte auf Basis der Recyclingfähigkeit von Verpackungen an den tatsächlichen Möglichkeiten und Grenzen der eingesetzten Sortier- und Verwertungsanlagen für Verpackungsabfälle orientieren müssen.

Die vorliegende Studie gibt einen Überblick der ermittelten Praxis der Sortierung und Verwertung (SuV) von Verpackungsabfällen aus der Sammlung der deutschen dualen Systeme in den Jahren 2021 und 2022. Der vorliegende Teilbericht 2 baut auf dem Teilbericht 1 UBA-TEXTE 125/2022 (Grummt, 2022) auf. Sortierer und Verwerter deutscher Verpackungsabfälle aus der Sammlung der Systeme wurden nach aktueller Prozesstechnik und konkreten Problemen bei der Trennung, Sortierung und Verwertung befragt. Für den vorliegenden Bericht wurde ein Großteil der Erhebungsergebnisse des Teilberichts 1 wiederverwendet. Weißblech- und Aluminiumaufbereiter und -verwerter sowie PPK-(Papier, Pappe, Karton) Sortieranlagen wurden erstmalig befragt. Die Betreiber von LVP-Sortieranlagen hatten die Möglichkeit, ergänzend zur Erhebung für den vorangegangenen Betrachtungszeitraum ausgewählte Fragen zu beantworten. Über eine mengenbasierte Berechnung eines spezifischen Kennwerts kann eine Aussage über das Vorhandensein einer Sortier- und Verwertungsinfrastruktur für diese Abfälle getroffen werden.

Gemäß VerpackG veröffentlicht die Zentrale Stelle Verpackungsregister (ZSVR) im Einvernehmen mit dem Umweltbundesamt (UBA) jährlich bis zum 1. September einen „Mindeststandard zur Bemessung der Recyclingfähigkeit von systembeteiligungspflichtigen Verpackungen gemäß § 21 Abs. 3 VerpackG“. Die vorliegenden Studienergebnisse sollen als wissenschaftliche Grundlage für diesen Mindeststandard (insbesondere Anhänge 1, 2 und 3) dienen.

Teilbericht 1 und Teilbericht 2 stellen eine Fortführung und Aktualisierung des Berichts UBA-TEXTE 11/2021 (Dehoust et al., 2021) dar. Zunächst wird die von Dehoust et al. verwendete Methode zusammengefasst und die Weiterentwicklung der Methode erläutert. Daraufaufgehend wird die Berechnung der Kenngröße „Anwendungsgrad“ erläutert sowie der Begriff der

„hochwertigen werkstofflichen Verwertung“ definiert. Darauf aufbauend werden die aktuell bestehenden Sortier- und Verwertungspfade auf Basis der Erhebung veranschaulicht und die dazugehörigen Sortier- und Verwertungsprozessvarianten mengenmäßig dargestellt. Des Weiteren werden die von den Akteuren der Entsorgungsbranche genannten Probleme aufgelistet und diskutiert. Weiterhin werden Änderungen in der Prozesstechnik gegenüber den bisherigen Bezugsjahren sowie innovative technische Potenziale beim Recycling beschrieben. Der Bericht endet mit einer Empfehlung zur Berücksichtigung der Praxis der SuV für den Mindeststandard.

2 Methode und Begriffserläuterungen zur Ermittlung der Praxis der Sortierung und Verwertung

2.1 Kurzbeschreibung der Methode

Die Praxis der Sortierung und Verwertung (Praxis der SuV) soll die Mengenströme im jeweiligen Bezugsjahr auf die verschiedenen Sortier- und Verwertungspfade mengenbezogen charakterisieren. Das bedeutet, dass die Sortier- und Verwertungspfade erfasst werden und jedem Pfad eine Menge zugeordnet wird. Dehoust et al. haben dafür im Bericht UBA-TEXTE 11/2021 eine Methode zur Ermittlung der Praxis der SuV entwickelt und für das Bezugsjahr 2019 angewendet (Dehoust et al., 2021). Für den vorliegenden Bericht wurde wiederholt mit dieser Methode gearbeitet. Die Kennwerte wurden neu bezeichnet, wobei die Symbolik an die Wahrscheinlichkeitslehre angelehnt wurde. Die Methode wurde dahingehend weiterentwickelt, dass, wie bereits im Teilbericht 1, jeweils ein dedizierter Kennwert für transparente PET-Flaschen und sonstige formstabile PET-Verpackungen angegeben wurde. Zudem wurden erstmalig die von den Letztempfängeranlagen angegebenen Rezyklatanwendungen quantitativ dargestellt. Die generellen Arbeitsschritte zur Durchführung der Methode sind identisch. Unterschiede liegen zum einen in der Berechnung der Kennwerte für die PET-Verpackungen und zum anderen in der Verwendung der Verwertungszuführungsmengen aus dem Mengenstromnachweis (MSN) für das Bezugsjahr 2021. Der erste Teilbericht basierte auf dem MSN 2020 (Grummt, 2022). Eine umfassende Erläuterung der Methode kann im eben genannten Bericht von Dehoust et al. nachgelesen werden, weshalb in diesem Kapitel nur in verkürzter Form auf die verwendete Methode eingegangen wird. Der Bericht von Dehoust et al. umfasst weiterhin zahlreiche Definitionen und juristische Begriffserklärungen zur Praxis der SuV (Dehoust et al., 2021, Kapitel 2). Für umfangreiche Begriffserklärungen wird daher an dieser Stelle darauf verwiesen.

Dehoust et al. definieren die Praxis der SuV folgendermaßen:

„Die Praxis der Sortierung und Verwertung gem. § 21 Abs. 1 VerpackG ist als Grundlage für die Ermittlung der Recyclingfähigkeit von Verpackungen deskriptiv zu ermitteln. Sie beschreibt alle am Markt in Deutschland vorhanden und tatsächlich mit Mengen belieferten Sortier- und Verwertungsanlagen. Dies schließt Anlagen im Probebetrieb, die einen tatsächlichen Verwertungsweg am Markt eröffnen, sowie Anlagen im Ausland, die nachweislich Mengen der Systeme aus Deutschland verarbeiten, ein. Erfasst werden sowohl Anlagen, die dem Stand der Technik entsprechen als auch solche, die diesem Stand nicht entsprechen. Nicht mit eingeschlossen sind Anlagen im Labor- und Technikumsmaßstab, Pilotanlagen und Anlagen im Testbetrieb, die keinen Verwertungsweg am Markt eröffnen.“ (Dehoust et al., 2021, S. 78)

Die Ermittlung der Praxis der SuV im vorliegenden Bericht basiert auf einer für die Bezugsjahre 2021 und 2022 durchgeführten Erhebung. Für den vorliegenden Teilbericht wurden Antworten von Letztempfängeranlagen aus dem Teilbericht 1 (Grummt, 2022) wiederverwendet. Für Teilbericht 1 wurden die Inhalte der Erhebungsbögen dem Bericht von Dehoust et al. (2021) entnommen und geringfügig überarbeitet (Anpassung des Layouts sowie Anpassung der Fraktionsnummern). Um die Ergebnisse aus Teilbericht 1 wiederzuverwenden, wurden für die aktuelle Befragung wie bereits im Teilbericht 1, Inhalte aus dem bereits aktualisierten „Mindeststandard zur Bemessung der Recyclingfähigkeit von systembeteiligungspflichtigen Verpackungen gemäß § 21 Abs. 3 VerpackG“ in der Fassung des 31.08.2021 (ZSVR, 2021) übernommen. Das letztgenannte Dokument wird im Folgenden mit dem jeweiligen Erscheinungsjahr gekennzeichnet vereinfacht als „Mindeststandard“ bezeichnet. Für den Teilbericht 1 wurden die überarbeiteten Erhebungsbögen an Akteure der Entsorgungsbranche

versendet, deren Anlagen im Jahr 2020 mit Mengen der dualen Systeme aus Deutschland beliefert wurden. Dazu gehören die folgenden Sortier- und Letztempfängeranlagen:

- ▶ Sortieranlagen von LVP (Leichtstoffverpackungen),
- ▶ Letztempfängeranlagen von Verpackungen aus Folie, PET (Polyethylenterephthalat), PS (Polystyrol) sowie formstabilen und flexiblen Verpackungen aus PE (Polyethylen) und PP (Polypropylen),
- ▶ Letztempfängeranlagen von FKN (Flüssigkeitskartons) und PPK aus LVP (Papier, Pappe, Kartonagen aus der LVP-Sortierung),
- ▶ Letztempfängeranlagen von PPK aus dem Blauen System,
- ▶ Letztempfängeranlagen (Aufbereitungsanlagen) von Behälterglas.

Im vorliegenden Teilbericht 2 wurden die Erhebungsergebnisse und Angaben der Letztempfängeranlagen aus dem Teilbericht 1 wiederverwendet. Neue Letztempfängeranlagen sowie Letztempfängeranlagen, die bisher keinen Erhebungsbogen zurücksendeten, wurden bei der aktuellen Erhebung kontaktiert bzw. erneut kontaktiert. Weiterhin wurden folgenden Anlagen für den Teilbericht 2 befragt:

- ▶ Sortieranlagen von LVP mit ausgewählten Fragen,
- ▶ Weißblechaufbereiter und -verwerter mittels Erhebungsbogen,
- ▶ Aluminiumaufbereiter und -verwerter mittels Erhebungsbogen,
- ▶ Sortieranlagen von PPK (Papier, Pappe, Karton) mittels Erhebungsbogen.

Die Adressdaten wurden durch die Zentrale Stelle Verpackungsregister (ZSVR) zur Verfügung gestellt. Sie entstammten den MSN 2021 sowie den Stammdaten der Software wme.fact.¹ Die überarbeiteten Erhebungsbögen sowie der Fragenkatalog (nur LVP-Sortieranlagen) wurden postalisch oder per E-Mail versendet und sind im Anhang A (A.1 bis A.13) dargestellt. Sie wurden nur geringfügig (insbesondere redaktionell) zur vorangegangenen Befragung des Teilberichts 1 angepasst, um vergleichbare Ergebnisse sowie eine gemeinsame Auswertung zu gewährleisten. Um die Rücklaufquote zu erhöhen, wurden an einige Anlagen Erinnerungsschreiben nach Ablauf der Frist versendet.

Die finalen Rücklaufquoten und abgedeckten Mengenanteile der Befragung sind im Kapitel 3 unter den jeweiligen Abschnitten dargelegt. Das Ergebnis wurde als repräsentativ gewertet, wenn der Mengenanteil der Verwerter, die an der letzten bzw. aktuellen Befragung teilnahmen, mindestens 70 % an der Gesamt-Verwertungszuführungsmenge aus dem MSN 2021 betrug.²

Die Sortierer und Verwerter wurden in den Fragebögen nach aktuellen Prozesstechniken und spezifischen Problemen bei der Trennung, Sortierung und Verwertung befragt. Die Auswertung der Erhebungsbögen ist Anhang B (B.1 bis B.13) zu entnehmen. Diese Anhänge können aufgrund von enthaltenen Betriebs- und Geschäftsgeheimnissen nicht veröffentlicht werden.

¹ <https://www.wme-fact.de/>.

² Im Teilbericht 1 war die Erhöhung dieser Grenze vorgesehen, daher wurde sie im Teilbericht 2 von 50 % auf 70 % angehoben.

Folgende grundsätzliche Arbeitsschritte sind notwendig, um die Praxis der SuV für das jeweilige Bezugsjahr zu ermitteln und darzustellen. Zusätzlich ist angegeben, welche Arbeitsschritte für die aktuelle Befragung nur bedingt stattfanden:

- ▶ Aktualisierung und Überarbeitung der Erhebungsbögen (Anpassungen der Fraktionsnummern, Recyclingunverträglichkeiten, Prozesstechniken etc.). Hinweis: Dies erfolgte für Teilbericht 2 für Fragebögen aus Teilbericht 1 nur redaktionell, um Ergebnisse der Teilberichte gemeinsam verwenden zu können. Für die erstmalig befragten Metallaufbereitungs- und verwertungsanlagen sowie PPK-Sortieranlagen wurden in Zusammenarbeit mit Expert*innen des UBA sowie einer externen Expertin für faserbasierte Verpackungen (E-Mail von Fr. Tempel am 06.12.2022) neue Erhebungsbögen verfasst.
- ▶ Versendung der überarbeiteten Erhebungsbögen an die jeweiligen Sortierer und Verwerter bzw. Aufbereiter. Hinweis: An die LVP-Sortierer, die bei der Erhebung im letzten Bezugszeitraum teilnahmen und einen Erhebungsbogen ausgefüllt haben, wurden lediglich ausgewählte Fragen versendet, kein vollständiger Erhebungsbogen (Anhang A.1.2).
- ▶ Auswertung der Angaben in den Erhebungsbögen und Berechnung der Anwendungsgrade. Eine detaillierte Beschreibung dazu ist im Abschnitt 2.2 enthalten.
- ▶ Erstellung von Fließdiagrammen zur Abbildung der Sortier- und Verwertungsprozessvarianten, Pfadbeschreibungen und Endprodukte.
- ▶ Erstellung von Balkendiagrammen zur Verdeutlichung der Anwendungsgrade und der Einschätzung zur Variante „Stand der Technik“ („beste verfügbare Technik“, engl. „best available techniques“ – BVT). Diese Einschätzung erfolgt, um die Sortier- und Verwertungsprozesse zu identifizieren, die zwar noch in der Praxis verfügbar sind, aber historisch gewachsene Prozesse darstellen, die bereits in anderen Anlagen durch fortschrittlichere Prozesse ersetzt wurden. Für eine umfassende Begriffserklärung zum „Stand der Technik“ wird an dieser Stelle auf den Bericht von Dehoust et al. (2021) verwiesen. Die Zuordnung der Prozessvarianten zum Stand der Technik basiert im vorliegenden Bericht teilweise auf den Angaben in den Berichten von Dehoust et al. (2021) und Grummt (2022) sowie der Einschätzung von Fachexpert*innen des UBA und eines externen Experten (Gespräche mit Hr. Dr. Christiani am 22.03.2023 und 27.03.2023). Im vorliegenden Bericht sind die Balkenabschnitte, die als Stand der Technik-Prozessvarianten eingestuft wurden, grün (hell- oder dunkelgrün) gekennzeichnet. Prozessvarianten, die nicht als „Stand der Technik“ eingestuft wurden, werden als „sonstige betriebliche Praxis“ gekennzeichnet. Ausgenommen sind hierbei Prozessvarianten von Anlagen, die nicht den Referenzprozessen entsprechen. Diese sind in Balkenabschnitten grau dargestellt (weitere Erläuterungen dazu in den folgenden zwei Abschnitten 2.2 und 2.3).
- ▶ Zusammenstellung und ggf. Bewertung der Einschätzungen der Sortierer und Verwerter zu den Recyclingunverträglichkeiten und problematischen Verpackungsmerkmalen.

2.2 Berechnung der Anwendungsgrade

Als Kennwert der Praxis der SuV wurde der mengenbezogene **Anwendungsgrad** verwendet, welcher durch Dehoust et al. folgendermaßen definiert wird:

„Zentrale Kenngröße bildet der massebezogene Anwendungsgrad eines Recyclingpfades bezogen auf die gesamte Sammelmenge (LVP, PPK oder Glas). Hiermit wird am ehesten die Wahrscheinlichkeit abgebildet, mit der eine bestimmte Verpackung, soweit sie vom Endverbraucher in die getrennte Erfassung gegeben wird, einer bestimmten Verwertungsart unter

jeweiligen Prozessbedingungen zuzuordnen ist. Der jeweilige Weg durch die Verwertungskaskade wird als Pfad tituliert. Beziffert werden nur die Pfade, die zu Rezyklat führen, mit denen der korrespondierende Primärwerkstoff substituiert wird.“ (Dehoust et al., 2021, S. 97)

Weiterhin ist zu berücksichtigen:

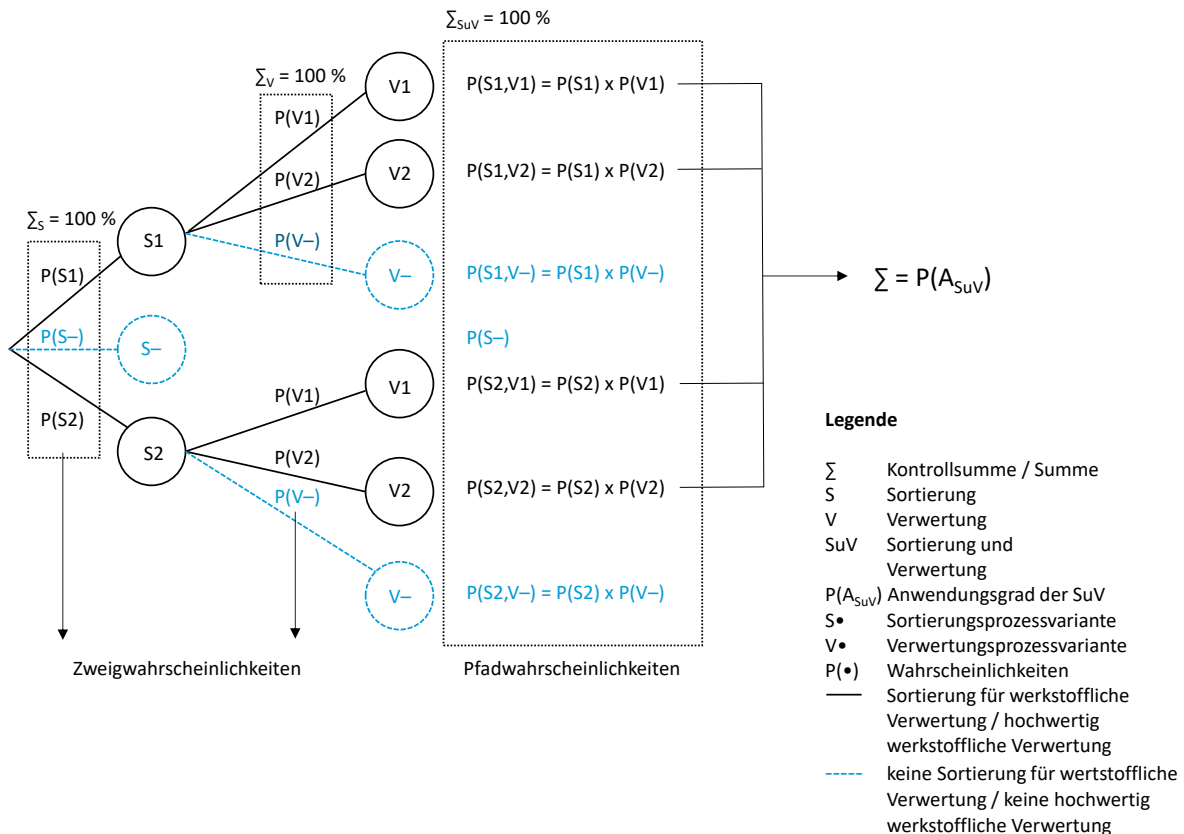
„Um Fehlinterpretationen des (aus Mengenstromdaten entwickelten) Anwendungsgrades vorzubeugen, sei nochmals betont, dass dieser keine eigenständige Bilanzierungsgröße bezüglich der Recyclingfähigkeit einer Verpackung bzw. einer Verpackungsgruppe darstellt. Er bildet lediglich das Vorhandensein und die Verteilung von Verwertungsstrukturen (Referenzprozessen) ab, die eine Verpackung in der Praxis durchlaufen muss, um teilweise oder vollständig zum Rezyklat zu werden. Ein Anwendungsgrad von 100 % sagt also nichts darüber aus, ob und in welchem Umfang eine zuzuordnende Verpackung am Ende des Recyclingpfades zum Rezyklat (im Sinne eines materialidentischen Neuwaresubstituts) wird, sondern lediglich, dass für diese Verpackung zu 100 % entsprechende Referenzprozesse in der Praxis ausgebildet sind.“ (Dehoust et al., 2021, S. 96)

Da der Anwendungsgrad eine Wahrscheinlichkeit ausdrückt, ähnelt die Berechnung des Anwendungsgrades der Bestimmung von Wahrscheinlichkeiten mehrstufiger Zufallsexperimente. Die Rechenregeln für den Anwendungsgrad entsprechen dabei den Pfadregeln eines Baumdiagramms:

1. Die Wahrscheinlichkeit eines Pfades berechnet sich aus dem Produkt der dazugehörigen Zweigwahrscheinlichkeiten (Produktregel);
2. Die Wahrscheinlichkeit eines Ereignisses berechnet sich aus der Summe der dazugehörigen Pfadwahrscheinlichkeiten (Summenregel);
3. Alle Zweige, die von einem Knoten abgehen, tragen Wahrscheinlichkeiten, deren Summe gleich 1 bzw. 100 % ist (Schneider, 2015).

Abbildung 1 stellt beispielhaft ein Baumdiagramm zur Veranschaulichung der Berechnung des Anwendungsgrades der Sortierung und Verwertung $P(A_{SuV})$ dar. Die Symbolik für die Anwendungsgrade ist an die Wahrscheinlichkeitslehre angelehnt. Das Prädikat P steht dabei für die Wahrscheinlichkeit (engl. probability), dass ein Ereignis eintritt. A ist das Ereignis, für das die Wahrscheinlichkeit berechnet wird. Das Subskript gibt an, ob das Ereignis die Sortierung (S), die Verwertung (V) oder sowohl Sortierung und Verwertung (SuV) betrifft.

Abbildung 1: Baumdiagramm zur Veranschaulichung der Berechnung des Anwendungsgrades der Sortierung und Verwertung $P(A_{SuV})$



Quelle: Grummt (2022)

In Abbildung 2 sind die Definitionen der drei verschiedenen Anwendungsgrade $P(A_S)$, $P(A_V)$ und $P(A_{SuV})$ vorab definiert.

Abbildung 2: Definitionen der drei Anwendungsgrade $P(A_S)$, $P(A_V)$ und $P(A_{SuV})$

$P(A_S)$ = Anwendungsgrad der Sortierung

Wahrscheinlichkeit, dass eine Verpackung in einer LVP-Sortieranlage auf eine spezifische Sortiertechnik trifft. Annahme: Alle LVP-Sortieranlagen erhalten als Eingangsmaterial die gleiche Verteilung an Verpackungen.

$P(A_V)$ = Anwendungsgrad der Verwertung

Wahrscheinlichkeit, dass eine Verpackung einer hochwertigen werkstofflichen Verwertung zugeführt wird (die Sortierung wird dabei ausgeklammert).

$P(A_{SuV})$ = Anwendungsgrad der Sortierung und Verwertung

Wahrscheinlichkeit, dass eine Verpackung sowohl auf eine spezifische Sortiertechnik als auch auf einen hochwertigen werkstofflichen Verwertungspfad trifft.

Quelle: eigene aktualisierte Darstellung nach Grummt (2022), Umweltbundesamt, auf methodischer Grundlage von Dehoust et al. (2021)

Um die Anwendungsgrade zu ermitteln, werden, basierend auf Ausführungen im Bericht von Dehoust et al. 2021, die folgenden Arbeitsschritte a), b) und c) anhand Abbildung 1 erläutert.

a) Berechnung des Anwendungsgrades der Sortierung $P(A_s)$

1. Betrachtung aller LVP-Sortieranlagen, welche im Bezugsjahr mit Mengen der dualen Systeme beliefert wurden.
2. Klassifizierung von Sortierprozessvarianten $S\bullet$ (in Abbildung 1: S1 und S2) für jede hochwertig verwertbare Fraktion je Bezugsjahr.
3. Summation der einzelnen Verarbeitungsmengen der LVP-Sortieranlagen für die Sortierprozessvarianten $S\bullet$ (in Abbildung 1: S1 und S2).
4. Bildung des Quotienten aus der in 3. berechneten Summe und der LVP-Gesamt-Verarbeitungsmenge im Bezugsjahr. Das Ergebnis entspricht den Zweigwahrscheinlichkeiten $P(S\bullet)$ der Sortierprozessvarianten $S\bullet$. In Abbildung 1: $P(S1)$ gibt beispielsweise die Wahrscheinlichkeit an, dass eine Verpackung auf die Sortierprozessvariante S1 trifft und für eine werkstoffliche Verwertung bereitgestellt wird.
5. Die Summe der Wahrscheinlichkeiten $P(S\bullet)$ der Zweige, bei denen eine Verpackung für eine werkstoffliche Verwertung sortiert und bereitgestellt wird, entspricht dem Anwendungsgrad der Sortierung $P(A_s)$. Dieser gibt die Wahrscheinlichkeit an, mit der eine Verpackung in einer LVP-Sortieranlage auf eine spezifische Sortiertechnik trifft, mittels der die Verpackung einer Fraktion zugeordnet und für eine werkstoffliche Verwertung bereitgestellt wird. In Abbildung 1 entspricht dies der Summe aus $P(S1)$ und $P(S2)$, ohne $P(S-)$.
6. Die Wahrscheinlichkeit $P(S-)$ der Sortierprozessvariante $S-$ zeigt in Abbildung 1 die Wahrscheinlichkeit an, mit der eine Verpackung nicht sortiert und für eine werkstoffliche Verwertung bereitgestellt wird.
7. Die Wahrscheinlichkeiten aller Sortierungsprozessvarianten $P(S\bullet)$ ergeben in Summe immer 100 %. Hier: $P(S1) + P(S2) + P(S-)$. Diese Summe wird als Kontrollsumme der Sortierung $\sum_s$ bezeichnet und ist beispielhaft in Abbildung 1 dargestellt.

b) Berechnung des Anwendungsgrades der Verwertung $P(A_v)$

1. Nur Betrachtung von Letztempfängeranlagen.
2. Klassifizierung in Letztempfängeranlagen mit Endprodukten, welche durch hochwertige werkstoffliche Verwertung hergestellt wurden (im Folgenden auch als Referenzanlagen bezeichnet) und in Anlagen ohne hochwertige werkstoffliche Verwertung.
3. Klassifizierung der Anlagen mit hochwertiger werkstofflicher Verwertung in Verwertungsprozessvarianten $V\bullet$.
4. Summation der einzelnen Verarbeitungsmengen der Verwertungsanlagen für die Verwertungsprozessvarianten $V\bullet$ der jeweiligen Fraktion(en).
5. Bildung des Quotienten aus der in 4. berechneten Summe und der Gesamt-Verwertungsanlage der jeweiligen Fraktion(en) im Bezugsjahr. Das Ergebnis entspricht den Zweigwahrscheinlichkeiten $P(V\bullet)$ der Verwertungsprozessvarianten $V\bullet$. In Abbildung 1: $P(V1)$ gibt beispielsweise die Wahrscheinlichkeit an, dass eine Verpackung mit der Verwertungsprozessvariante V1 einer hochwertigen werkstofflichen Verwertung zugeführt wird bzw. in einer Referenzanlage verwertet wird.
6. Die Summe der Wahrscheinlichkeiten $P(V\bullet)$ der Zweige mit hochwertiger werkstofflicher Verwertung entspricht dem Anwendungsgrad der Verwertung $P(A_v)$. Dieser entspricht der Wahrscheinlichkeit, dass eine Verpackung einer hochwertigen werkstofflichen Verwertung zugeführt wird bzw. in einer Referenzanlage verwertet wird. Die Sortierung wird bei dieser Kennzahl nicht einberechnet bzw. wird extra betrachtet. In Abbildung 1 entspricht dies der Summe aus $P(V1)$ und $P(V2)$, ohne $P(V-)$.

7. Die Wahrscheinlichkeit $P(V-)$ der Verwertungsprozessvariante $V-$ zeigt die Wahrscheinlichkeit an, dass eine Verpackung keiner hochwertigen werkstofflichen Verwertung zugeführt wird bzw. in keiner Referenzanlage verwertet wird.
8. Die Wahrscheinlichkeiten aller Verwertungsprozessvarianten $P(V\bullet)$ ergeben in Summe immer 100 %. Hier: $P(V1) + P(V2) + P(V-)$. Diese Summe wird als Kontrollsumme der Verwertung $\sum_V$ bezeichnet und ist beispielhaft in Abbildung 1 dargestellt.

c) Berechnung des Anwendungsgrades der Sortierung und Verwertung $P(A_{SuV})$

1. Multiplikation der einzelnen Zweigwahrscheinlichkeiten entlang der Pfade der Sortier- und Verwertungsprozessvarianten. In Abbildung 1: Aus der Multiplikation der Zweigwahrscheinlichkeiten $P(S1)$ und $P(V1)$ ergibt sich die Pfadwahrscheinlichkeit $P(S1,V1)$. Die Berechnung der anderen Pfade ist in Abbildung 1.
2. Die Summation der einzelnen Pfadwahrscheinlichkeiten ergibt den finalen Anwendungsgrad der Sortierung und Verwertung $P(A_{SuV})$. Dieser beschreibt die Wahrscheinlichkeit, dass eine Verpackung sowohl auf eine spezifische Sortiertechnik als auch auf einen hochwertigen werkstofflichen Verwertungspfad trifft. Nicht einberechnet werden dabei die Pfade mit den Zweigwahrscheinlichkeiten $P(S-)$ und $P(V-)$. Der Grund dafür ist, dass nur hochwertige werkstoffliche Verwertung für den Mindeststandard relevant ist.
3. Die Pfadwahrscheinlichkeiten ergeben in Summe immer 100 %. Diese Summe wird als Kontrollsumme der Sortierung und Verwertung $\sum_{SuV}$ bezeichnet. Die Summation ist beispielhaft in Abbildung 1 dargestellt.

Alle eben genannten Arbeitsschritte unter a), b) und c) gelten für die Auswertung der Erhebungsbögen der LVP-Sortierer in Kombination mit den Verwertern von Folien, flexiblen und formstabilen Verpackungen aus PE und PP, PS, FKN, PPK aus LVP, Fe und Al (siehe Abkürzungsverzeichnis und Erläuterung im Abschnitt 3.1.2).

Für PET-Verpackungen wurde die Methode weiterentwickelt. Transparente PET-Flaschen und sonstige formstabile PET-Verpackungen werden gemäß Spezifikationen in den folgenden Verhältnissen in verschiedene Fraktionen einsortiert. Wir gehen dabei zur Vereinfachung von einer Reinheit von 100 % aus. In den im Folgenden genannten Spezifikationen 325, 328-(0-6) soll es sich immer um gebrauchte restentleerte, systemverträgliche PET-Verpackungen mit einem Volumen ≤ 5 Liter handeln:

- ▶ 325: PET-Flaschen, transparent; mind. 98 Masse-% transparente PET-Flaschen (z. B. Getränke-, Waschmittel- und Haushaltsreinigerflaschen) inkl. Nebenbestandteilen wie Verschlüsse, Etiketten usw.; < 2 Masse-% opake PET-Artikel, andere PET-Artikel und sonstige Kunststoff-Artikel (Der Grüne Punkt - Duales System Deutschland GmbH, 2023b);
- ▶ 328-0: PET; mind. 95 % gemischte PET-Verpackungen (z. B. Obstschalen, Kosmetikverpackungen, Getränke- und Waschmittelflaschen sowie Flaschen von Haushaltsreinigern) inkl. Nebenbestandteilen wie Verschlüsse, Etiketten usw. (Der Grüne Punkt - Duales System Deutschland GmbH, 2004);
- ▶ 328-1: Misch-PET 90/10; mind. 90 Masse-% transparente PET-Flaschen (z. B. Spülmittel- oder Getränkeflaschen) und max. 10 Masse-% sonstige formstabile PET-Artikel (z. B. Becher, Schalen) klar, bunt, opak inkl. Nebenbestandteilen wie Verschlüsse, Etiketten usw. (Der Grüne Punkt - Duales System Deutschland GmbH, 2023c);
- ▶ 328-2: Misch-PET 70/30; mind. 70 Masse-% transparente PET-Flaschen (z. B. Spülmittel- oder Getränkeflaschen) und max. 30 Masse-% sonstige formstabile PET-Artikel (z. B. Becher,

Schalen) klar, bunt, opak inkl. Nebenbestandteilen wie Verschlüsse, Etiketten usw. (Der Grüne Punkt - Duales System Deutschland GmbH, 2023d);

- ▶ 328-3: Misch-PET 50/50; mind. 50 Masse-% transparente PET-Flaschen (z. B. Spülmittel- oder Getränkeflaschen) und max. 50 Masse-% sonstige formstabile PET-Verpackungen (z. B. Becher, Schalen) klar, bunt, opak inkl. Nebenbestandteilen wie Verschlüsse, Etiketten usw. (Der Grüne Punkt - Duales System Deutschland GmbH, 2014);
- ▶ 328-5: PET-Schalen; mind. 75 Masse-% PET-Schalen (z. B. für Wurstaufschnitt, Obst oder Gemüse) und max. 20 Masse-% PET-Flaschen transparent, bunt /farblos inkl. Nebenbestandteilen wie Verschlüsse, Etiketten usw. (Der Grüne Punkt - Duales System Deutschland GmbH, 2023e);
- ▶ 328-6: PET-Schalen; mind. 90 Masse-% PET-Schalen (z. B. für Fleisch, Obst, Gemüse oder Salat) und max. 5 Masse-% transparente PET-Flaschen inkl. Nebenbestandteilen wie Verschlüsse, Etiketten usw. (Der Grüne Punkt - Duales System Deutschland GmbH, 2019).

Für PET-Flaschen gehen wir in der Fraktion 325 („PET-Flaschen, transparent“) von 100 % transparenten PET-Flaschen aus. Für die drei Misch-PET-Fraktionen 328-1, -2, -3, betrachten wir jeweils die Ober- und Untergrenze für transparente PET-Flaschen. Beispielsweise liegt bei der Fraktion 328-1 die Obergrenze für transparente PET-Flaschen bei 90 % und die Untergrenze bei 10 %. Für 328-0 liegt keine Angabe hinsichtlich des Anteils an PET-Flaschen vor, weshalb auch hier von 100 % ausgegangen wird. Diese Fraktion spielt mengenmäßig nur eine untergeordnete Rolle. Für jede der drei Fraktionen gibt es dementsprechend zwei Extremwerte. Die Produktmenge aller Extremwerte enthält $2^3 = 8$ Kombinationen. Für 325 und 328-0 liegt nur ein Wert vor. Die Fraktionen 328-5 und 328-6 („PET-Schalen“) werden für die Spannweite der PET-Flaschen nicht miteinbezogen, da die beiden Fraktionen nicht auf PET-Flaschen abzielen. Dies wurde im vorliegenden Teilbericht 2 gegenüber Teilbericht 1 angepasst. Für alle Kombinationen lässt sich nun $P(A_V)$ bestimmen. Schließlich werden aus den resultierenden Werten der Minimal- und Maximal-Wert (Worst Case und Best Case) bestimmt, welche die Spannweite darstellen. Anschließend kann $P(A_V)$ mit $P(A_S)$ der jeweiligen PET-Fraktionen multipliziert werden, um die Spannweite für $P(A_{SuV})$ zu bestimmen.

Für die sonstigen formstabilen Verpackungen wird analog verfahren, wobei dort die Fraktionen 328-5 und 328-6 („PET-Schalen“) einberechnet werden, jedoch nicht die Fraktion 325 („PET-Flaschen, transparent“). Die Berechnung setzt voraus, dass keine der Verpackungen vor dem Recycling aussortiert werden. Dies ist aber bei manchen PET-Verwerter insbesondere der Fall für Multilayer-PET-Schalen. Teilmengen für Multilayer- und Monolayer-Schalen lagen nicht vor.

Für die Einzelbetrachtung der LVP-Sortierer sind nur die Arbeitsschritte unter a) nötig, da die anschließende Verwertung nicht betrachtet wird. An dieser Stelle ist hervorzuheben, dass die LVP-Sortierer lediglich die prognostizierte LVP-Sammelmenge in Tonnen pro Jahr angegeben haben. Um $P(A_S)$ zu berechnen, wird deshalb die folgende Voraussetzung angenommen: Alle LVP-Sortieranlagen erhalten als Eingangsmaterial die gleiche Verteilung an Verpackungen.

Glasaufbereiter stellen einen Sonderfall dar. Für diese Anlagen entspricht die Berechnung und Mengenverteilung auf die einzelnen Verwertungsprozessvarianten $V_\bullet$ bereits den vollständigen Pfaden, da keine LVP-Sortierung vorgeschaltet ist. Abbildung 3 zeigt beispielhaft die Berechnung von $P(A_V)$ für Glas. Die Bildung der Pfadwahrscheinlichkeiten erfolgt in diesem Fall nur einstufig (Zweige entsprechen Pfaden). Die Zweigwahrscheinlichkeiten werden für Glas im folgenden Text als Pfadwahrscheinlichkeiten bezeichnet, weil sie in diesem Fall das Gleiche bezeichnen.

Bei PPK-Verpackungen kann vor der Verwertung in Papierfabriken eine PPK-Sortieranlage vorgelagert sein. Im vorliegenden Teilbericht 2 wurde für PPK ein Anwendungsgrad der Sortierung $P(A_S)$ von 100 % angenommen. Diese Entscheidung basiert auf der Tatsache, dass einige PPK-Sortieranlagen keine Mengenangaben im Fragebogen machten und einige PPK-Sortieranlagen angaben, PPK lediglich zu verpressen, ohne weitere Angaben zu Menge oder Altpapiersorte zu machen. Für zukünftige Berichte sollte die Datenbasis für PPK-Sortieranlagen verbessert werden. Für den finalen Anwendungsgrad der Sortierung und Verwertung $P(A_{SuV})$ für PPK wurden demnach der $P(A_S)$ von 100 % mit dem $P(A_V)$ der Papierfabriken multipliziert.

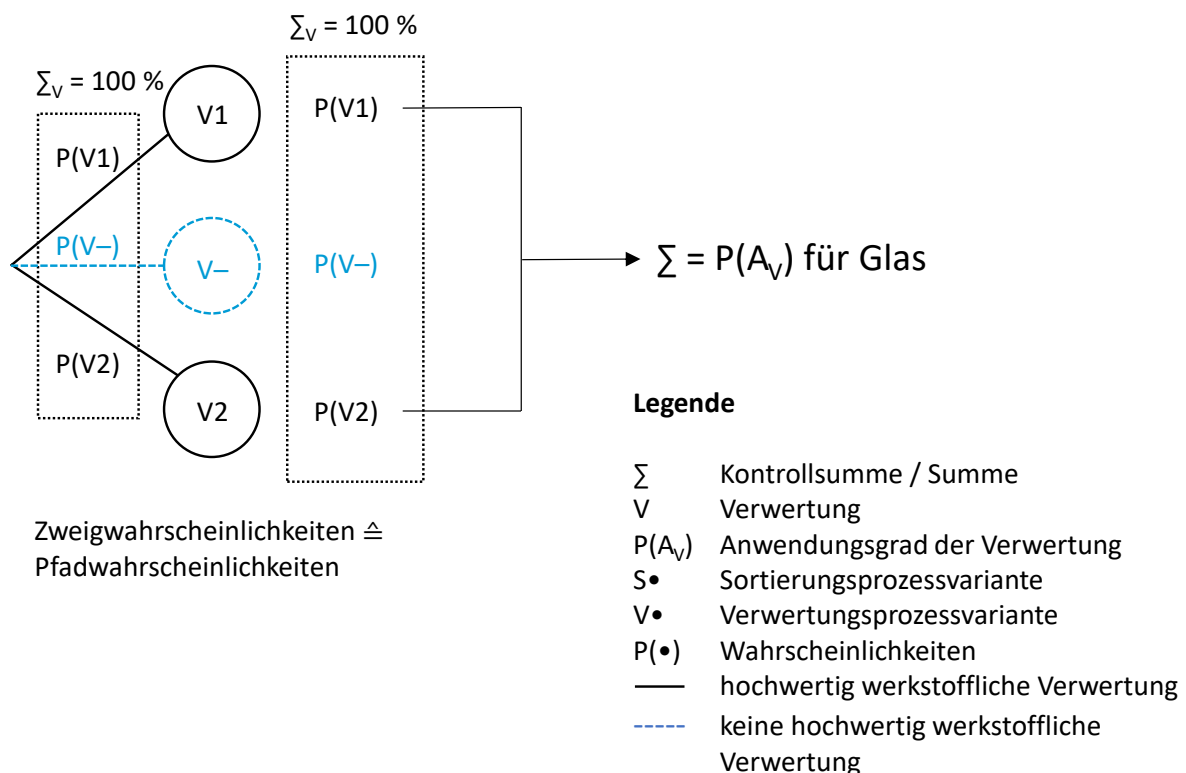
Für die Berechnung von $P(A_V)$ wurden die anlagen- und fraktionsbezogenen Verwertungszuführungsmengen aus den MSN 2021 verwendet (unbereinigt). Diese wurden durch die ZSVR bereitgestellt (Datenübermittlung ZSVR an UBA am 24.11.2022). Für die LVP-Sortierung wurden die prognostizierten Mengenangaben aus der aktuellen Befragung der LVP-Sortierer genutzt (Bezugszeitraum 2022). Für die PPK-Sortierung wurden die prognostizierten Mengenangaben aus den Erhebungsbögen der PPK-Sortierer verwendet.

An dieser Stelle sei erwähnt, dass in den Erhebungsbögen die aktuelle Prozesstechnik zum Zeitpunkt der Befragung abgefragt wurde:

- Erhebung Teilbericht 1: Ende 2021 und Anfang 2022
- Erhebung Teilbericht 2: Ende 2022 und Anfang 2023

Aufgrund der Zeiträume für signifikante Änderungen der Infrastruktur erachten wir diese Unschärfe als hinnehmbar.

Abbildung 3: Baumdiagramm zur Veranschaulichung der Berechnung des Anwendungsgrades der Verwertung $P(A_V)$ für Glas



Quelle: eigene aktualisierte Darstellung nach Grummt (2022), Umweltbundesamt

2.3 Definition einer hochwertigen werkstofflichen Verwertung

Im Mindeststandard in der Fassung vom 31.08.2022 wird der Begriff „Recyclingfähigkeit“ folgendermaßen definiert:

„Recyclingfähigkeit in diesem Dokument bezieht sich im Unterschied zum Recyclingbegriff des KrWG immer auf ein hochwertiges und werkstoffliches Recycling. Diese Recyclingfähigkeit ist die grundsätzliche und graduelle Eignung einer Verpackung, nach Durchlaufen industriell verfügbarer Rückgewinnungsprozesse Neuware in werkstofftypischen Anwendungen zu substituieren.“ (ZSVR, 2022, S. 8)

Zusätzlich zu einer werkstofflichen Verwertung durch Letztempfängeranlagen ist für den Mindeststandard und damit zur Berechnung des $P(A_{\text{SuV}})$ ein hochwertiges werkstoffliches Recycling ausschlaggebend (im folgenden Text zur Vereinfachung als „hochwertige werkstoffliche Verwertung“) bezeichnet. Dabei ist die Möglichkeit des Austausches von Neuware durch Rezyklate in werkstoffspezifischen Anwendungen das entscheidende Kriterium (ZSVR, 2022, S. 10). Der vorliegende Teilbericht 2 bezieht sich bei der Definition der Referenzanlagen mit hochwertiger werkstofflicher Verwertung auf den Bericht von Dehoust et al. (Dehoust et al., 2021, S. 87 ff.). Die Referenzanlagen und -prozesse der Rezyklate werden in Abbildung 4 zusammengefasst. Grün gekennzeichnet sind dabei Verwertungsprozesse und -produkte, die in nachfolgenden Betrachtungen als hochwertige werkstoffliche Verwertung berücksichtigt werden. Hinter den jeweiligen Fraktionen sind die Fraktions- und Spezifikationsnummern angegeben (BV Glas et al., 2014; Der Grüne Punkt - Duales System Deutschland GmbH, 2023a; DIN, 2014). Der vorliegende Teilbericht 2 stuft die Kunststoffverwertungsanlagen nicht wie im Teilbericht 1 nur nach Endprodukt der Verwerter ein (Regranulat, Mahlgut, Agglomerat oder direkt hergestellte Endprodukte), sondern nach den angegebenen Rezyklatanwendungen. Die Rezyklatanwendungen werden in den meisten Fällen nicht direkt beim Kunststoffrecycler hergestellt, sondern in späteren Prozessschritten beim Verarbeiter (engl. „Converter“).

Für faserbasierte Verpackungen stellen beispielsweise der Einsatz von Papierfasern in Faserplatten- und Dämmstoffprodukten, in Ersatzbrennstoff (EBS), im Straßenbau oder in der Bauchemie keine Referenzprozesse dar. Weiterhin werden beispielsweise Kunststoffverwertungsanlagen, die Rezyklatanwendungen angeben, die keine Neuware in werkstofftypischen Anwendungen substituieren, nicht als Referenzanlagen angesehen (z. B. trockenmechanisch aufbereitete Intrusionsprodukte, die Holz oder Beton ersetzen, wie Palisaden, Zäune, Parkbänke etc.).

Im Konsultationsverfahren des Mindeststandards 2023 wurde eine neue Definition für „Hochwertiges Recycling“ aufgenommen. Dies stellt keine inhaltliche Änderung dar, sondern dient lediglich dem besseren Verständnis des Begriffs. Zudem werden zur Klarstellung Beispiele für ein hochwertiges werkstoffliches Recycling i. S. d. Mindeststandards genannt. Aufgelistet sind sowohl Beispiele für Verpackungsanwendungen (Einsatz von PP-Regranulaten für die Herstellung von Farbeimern oder Pflanztöpfen von Beetpflanzen, Glasverpackungen in Behälterglas) als auch sekundäre Rezyklatanwendungen (Verpackungstahlschrotte in der Baustahlproduktion oder der Einsatz von PP-Regranulaten für die Herstellung von Putzeimern oder Ablagekörben). Der Einsatz von Papierfasern im Straßenbau, als auch Holz-, Beton- und Natursteinersatzprodukte aus trockenmechanisch aufbereiteten Kunststoffen sind als Beispiele für nicht hochwertig werkstoffliches Recycling aufgeführt (ZSVR, 2023a, S. 10, 2023b).

2.4 Quantitative Darstellung der Rezyklatanwendungen

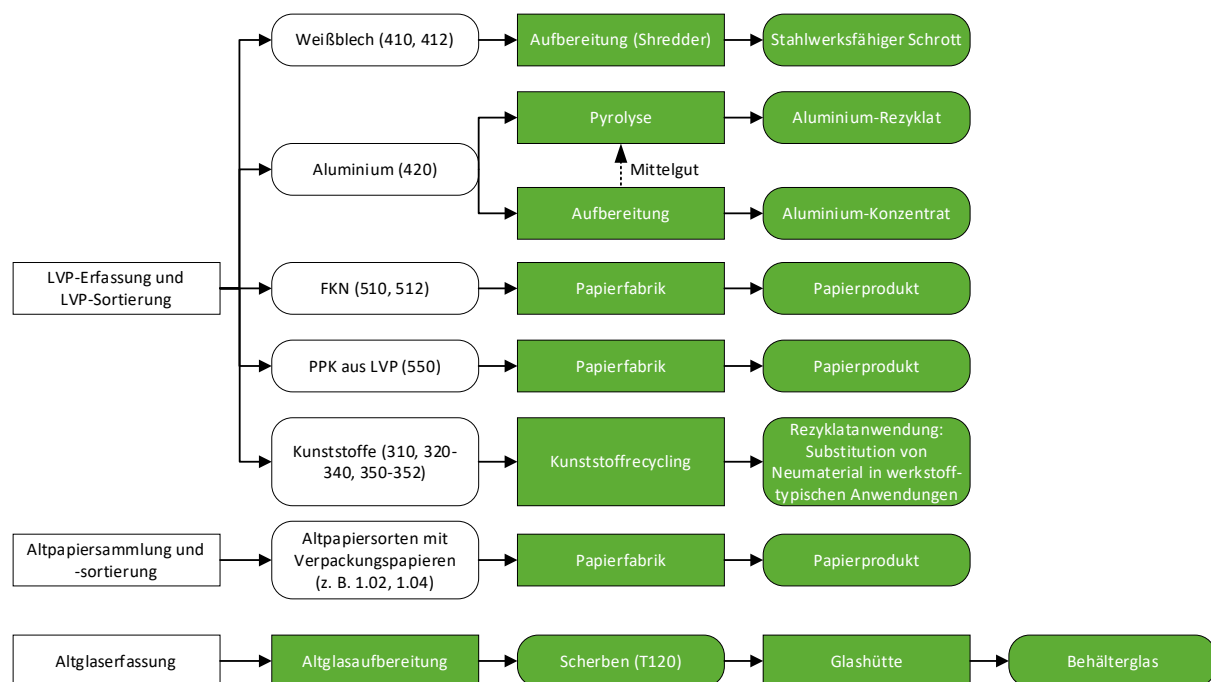
In der letzten und aktuellen Erhebung zur aktuellen Praxis der Sortierung und Verwertung wurden die Letztempfängeranlagen gebeten, Rezyklatanwendungen in den Fragebögen

anzukreuzen. Dieser Teilbericht 2 stellt die Rezyklatanwendungen erstmalig quantitativ dar. Einige Anlagen haben nur eine einzelne Rezyklatanwendung angegeben. In diesem Fall lässt sich die Verwertungszuführungsmenge eindeutig zur Rezyklatanwendung zuordnen. Wurden jedoch von einer Anlage mehrere Rezyklatanwendungen (mindestens 2 Kreuze) angegeben, kann die Verwertungszuführungsmenge nicht direkt den Anwendungen zugeordnet werden. Grund dafür ist, dass es nur eine binäre Zuordnung gibt (Rezyklatanwendung wurde angekreuzt oder nicht, aber nicht zu welchem Anteil). Es ist demnach nicht immer eindeutig, welche die mengenrelevanteste Rezyklatanwendung ist.

Um dies darzustellen, wurde eine Methode entwickelt, um die Rezyklatanwendungen anhand von Minima und Maxima in Balkenform zu visualisieren. Jede Zeile in den Diagrammen repräsentiert eine Rezyklatanwendung, während die Abszissenachse den Anteil an der Gesamtverwertungszuführungsmenge beschreibt. Wenn eine Anlage nur eine Rezyklatanwendung angab, können die Mengen addiert werden. Dies entspricht einem Strich auf dem Plot. Wenn Anlagen mehr als eine Rezyklatanwendung ankreuzten, ergibt sich eine Spannweite:

- Das Minimum umfasst die Anlagen, bei denen die Rezyklatanwendung eindeutig zugeordnet werden kann. Dies ist der Fall, wenn eine Anlage nur eine Rezyklatanwendung angab.
- Das Maximum umfasst alle Anlagen, die eine bestimmte Rezyklatanwendung angaben. Dabei wird die Annahme getroffen, dass die Anlagen ausschließlich diese Rezyklatanwendung herstellen (sogenanntes theoretisches Maximum).

Abbildung 4: Prozesse der hochwertigen werkstofflichen Verwertung (Referenzanlagen) nach Definition des Mindeststandards



Quelle: eigene aktualisierte Darstellung nach Grummt (2022), Umweltbundesamt, auf Grundlage von Dehoust et al. (2021), T120 gemäß BV Glas et al. (2014) und Der Grüne Punkt - Duales System Deutschland GmbH (2023a)

2.5 Praxis der SuV und Mindeststandard nach § 21 Abs. 3 VerpackG

Nach § 21 Abs. 3 VerpackG muss der Mindeststandard jährlich von der ZSVR im Einvernehmen mit dem UBA bis zum 1. September veröffentlicht werden. Für die Fortentwicklung des Mindeststandards sind laut § 21 Abs. 3 VerpackG die „einzelnen Verwertungswege und jeweilige Materialart“ von Verpackungen zu berücksichtigen. UBA und ZSVR müssen die Praxis der SuV kennen, um als zuständige Behörden den Mindeststandard anzupassen und weiterzuentwickeln. Den dualen Systeme sollte die Praxis der SuV ebenso bekannt sein, um die Beteiligungsentgelte für die Bemessung der Recyclingfähigkeit von Verpackungen festzulegen (Dehoust et al., 2021). Für die Bemessung der Recyclingfähigkeit einer Verpackung ist gemäß des Mindeststandards der für ein Recycling verfügbare Wertstoffgehalt einer Verpackung heranzuziehen (ZSVR, 2022). Die Ermittlung des Wertstoffgehalts erfolgt nach den folgenden drei Kriterien:

1. *„Eine Sortier- und Verwertungsinfrastruktur für ein hochwertiges werkstoffliches Recycling für diese Verpackung muss vorhanden sein.*
2. *Die Verpackung muss bezüglich des hochwertig zu verwertenden Anteils sortierbar sein, die Verpackungskomponenten müssen, soweit für ein hochwertiges werkstoffliches Recycling erforderlich, trennbar sein.*
3. *Keine der Verpackungskomponenten bzw. im Verpackungsmaterial enthaltenen Stoffe dürfen Recyclingunverträglichkeiten darstellen, die den Verwertungserfolg in der Praxis verhindern könnten.“* (ZSVR, 2022, S. 3-4)

Das 1. Kriterium bezieht sich auf die Verfügbarkeit einer Sortier- und Verwertungsinfrastruktur, die zu einer hochwertigen werkstofflichen Verwertung führt. Die fundierte Prüfung dieses Kriteriums bedingt die regelmäßige Ermittlung der Praxis der SuV. Gemäß Dehoust et al. (2021) muss nicht jeder Einzelfall, wie bspw. Sortier- und Verwertungspfade mit geringer Mengenrelevanz, dargestellt werden. Das Vorhandensein einer Sortier- und Verwertungsinfrastruktur wird im Anhang 1 des Mindeststandards über Spalte 3 erfasst (ZSVR, 2022, S. 15 ff.). Anhang 1 beinhaltet dafür spezifische Abgrenzungskriterien:

- Eine Eintragung in Spalte 3A bedeutet, dass für entsprechende Verpackungen eine Zuführung zu einer hochwertigen werkstofflichen Verwertung vorausgesetzt werden kann. Das Abgrenzungskriterium für $P(A_{SuV})$ liegt für Spalte 3A bei $\geq 80 \%$ (ZSVR, 2022).
- Bei Eintragung in Spalte 3B kann eine Zuführung zu einer hochwertigen werkstofflichen Verwertung nur begrenzt vorausgesetzt werden. Eine hochwertige werkstoffliche Verwertung für die dort aufgeführten Verpackungen ist möglich, aber nicht alle Verpackungsabfälle treffen auf entsprechende Sortier- und Verwertungstechnik. Das Abgrenzungskriterium für $P(A_{SuV})$ liegt für Spalte 3B bei $20 \% < P(A_{SuV}) < 80 \%$. Es wird empfohlen, für Verpackungen in Spalte 3B im Anhang 1 einen Einzelnachweis zu erbringen (ZSVR, 2022).
- Für Spalte 3C kann eine Zuführung zu einer hochwertigen werkstofflichen Verwertung nur im Einzelfall/marginal vorausgesetzt werden. Das Abgrenzungskriterium für $P(A_{SuV})$ liegt für Spalte 3C bei $\leq 20 \%$. Für Verpackungen, die Fraktionsnummern in dieser Spalte zuzuordnen sind, ist ein Einzelnachweis unerlässlich, um die Recyclingfähigkeit zu ermitteln (ZSVR, 2022).

Die Aufteilung der Spalte 3 ist im Hinblick auf den Mindeststandard 2023 in Diskussion. Eine Zusammenlegung der Spalten 3B und 3C mit Erfordernis von Einzelnachweisen ist derzeit geplant (Stand: Konsultationsfassung ZSVR, 2023a)

Das 2. Kriterium des Mindeststandards umfasst Verpackungsmerkmale, die eine erfolgreiche Identifizierung und anschließende Sortierung einer Verpackung in die vorgesehene Sortierfraktion verhindern können. Bei Vorliegen der dort aufgeführten Merkmale muss ebenso ein Einzelnachweis erbracht werden, wenn eine Recyclingfähigkeit festgestellt werden soll (Dehoust et al., 2021; ZSVR, 2022).

Das 3. Kriterium bezieht sich auf die Recyclingunverträglichkeiten, die eine hochwertige werkstoffliche Verwertung beeinträchtigen können. Anhang 3 des Mindeststandards beinhaltet nicht alle Stoffe, Materialien oder Verpackungsbestandteile, die in der Verwertung problematisch sein können. ZSVR und UBA haben hierbei die relevantesten Recyclingunverträglichkeiten ausgewählt. Diese können bereits in geringen Konzentrationen das Recycling erheblich beeinträchtigen. (Noch) nicht mengenrelevante Probleme oder Probleme, die lediglich in Materialverlust resultieren und kein „K.O.-Kriterium“ darstellen, können als weniger kritisch eingestuft werden und deshalb nicht im Mindeststandard Anhang 3 enthalten sein.

Bei allen drei genannten Kriterien spielt die Mengenrelevanz eine tragende Rolle. Kriterien mit erheblicher Mengenrelevanz in den derzeitigen Sortier- und Verwertungsinfrastrukturen können im Mindeststandard abgebildet sein, wohingegen weniger relevante Aspekte möglicherweise nicht aufgenommen werden (Dehoust et al., 2021).

3 Ergebnisse der Erhebung und Ermittlung der Praxis der Sortierung und Verwertung

3.1 LVP-Sortierung

3.1.1 Rücklauf der Erhebung

An insgesamt 39 LVP-Sortieranlagen (Leichtstoffverpackungen – LVP) mit Standort in Deutschland wurden ausgewählte Fragen per E-Mail oder ein Erhebungsbogen zugesendet. Mit 37 beantworteten Fragenkatalogen wurde eine Rücklaufquote von 95 % erreicht. Das Ergebnis ist als repräsentativ zu bewerten und spiegelt nahezu eine Totalerfassung aller relevanten LVP-Sortieranlagen wider. Für die zwei fehlenden Rückläufer wurden die Angaben und prognostizierten Verarbeitungsmengen aus der letzten Erhebung angenommen. Die Summe der durch die Sortierer angegebenen Verarbeitungsmengen (Sammelmenge gesamt) liegt in 2022 bei ca. 2,78 Mio. t. Die Mengen wurden auf 1.000 t/a gerundet. Inkludiert sind sowohl Anlagen, die Werkstoffkonzentrat als abgereinigtes Sammelgemisch zur Verfügung stellen (Anlagen zur Störstoffentfrachtung) als auch Anlagen mit integrierter Aufbereitung. Die Mengen liegen damit ca. 79.000 t über der von der Zentralen Stelle Verpackungsregister (ZSVR) übermittelten Gesamt-Erfassungsmenge (ca. 2,70 Mio. t) für 2021, welche auf Basis der Mengenstromnachweise (MSN) berechnet wurde (Datenübermittlung ZSVR an UBA am 12.12.2022). Dieser Unterschied ist u. a. durch die Einberechnung von stoffgleichen Nicht-Verpackungen (Wertstofftonne) sowie Rundungen der Zahlen durch die LVP-Sortierer erklärbar. Im Teilbericht 1 von Grummt (2022) wurden ähnliche Sammelmengen von ca. 2,78 Mio. t für 2020 und ca. 2,87 Mio. t für 2021 ermittelt.

Die Angaben der einzelnen Anlagen werden zum Schutz von Betriebs- und Geschäftsgeheimnissen und aus wettbewerbsrechtlichen Gründen vertraulich behandelt und nicht veröffentlicht.

Fragenkatalog oder Erhebungsbogen LVP-Sortierung

- ▶ Rücklaufquote 2022: im Inland: 95 % (37/39); zum Vergleich: Rücklaufquote 2020/2021 in Form von Erhebungsbögen: im Inland: 100 % (40/40)
- ▶ Sammelmenge der LVP-Sortierer, die Erhebungsbögen zurücksendeten: 2022: 2,78 Mio. t. (gerundet auf 1.000 t/a)
- ▶ Im Vergleich: LVP-Erfassungsmenge 2021 laut MSN: ca. 2,70 Mio. t. (Datenübermittlung ZSVR an UBA am 12.12.2022; gerundet auf 1.000 t/a)

3.1.2 Pfadbeschreibung

In LVP-Sortieranlagen werden gesammelte Leichtstoffverpackungen (LVP) aus haushaltsnaher Wertstofffassung (i. d. R. gelber Sack, gelbe Tonne) sortiert, materialspezifischen Gruppen zugeordnet und für den anschließenden Verwertungsprozess vorbereitet. In einigen LVP-Sortieranlagen werden zusätzlich stoffgleiche Nichtverpackungen sortiert (Knappe et al., 2021; Wunsch, 2021). Die Zuordnung einer Verpackung in eine materialspezifische Gruppe (Fraktion) ist von verschiedenen Faktoren abhängig. Beispiele für Einflussfaktoren sind neben dem Verpackungsmaterial (ggf. Kombination mehrerer Materialien) die Verpackungsgestaltung, die Sortiertechnik sowie der Zustand, mit dem die Verpackung in die getrennte Erfassung gegeben wird.

Das Sammelgemisch LVP besteht grundsätzlich aus Metall-, Kunststoff- und Verbundverpackungen sowie sonstigen Materialien, z. B. Holz, Naturmaterialien, Textilien etc. (Dehoust et al., 2021; Knappe et al., 2021). Unterschieden werden dabei hauptsächlich die folgenden Fraktionen: Kunststofffolien (überwiegend Low Density Polyethylen – LDPE), PE (Polyethylen), PP (Polypropylen), PS (Polystyrol), PET (Polyethylenterephthalat), MPO (Gemischte Polyolefine) sowie PO-flex, PPK aus LVP (Papier, Pappe, Kartonagen), Flüssigkeitskartons (FKN), Eisenhaltige (Fe-) Metalle wie Weißblech, Nichteisenhaltige (NE-) Metalle wie Aluminium und Mischkunststoffe. Die Anforderungen (z. B. die Reinheit und erlaubte Störstoffe) an die Fraktionen sind in verschiedenen Produktspezifikationen der dualen Systeme ausgeführt. Zum Zeitpunkt der Veröffentlichung des Berichts sind die wichtigsten Produktspezifikationen auf der Website des Dualen Systems Deutschland öffentlich abrufbar.³

Gemäß Knappe et al. sei „die Sortierung der wichtigste Schritt bei der Aufbereitung von Kunststoffabfällen“ (Knappe et al., 2021, S. 109). LVP-Sortieranlagen lassen sich wie bereits in den Berichten von Dehoust et al. (2021) und Grummt (2022) in vier verschiedene Kategorien einteilen:

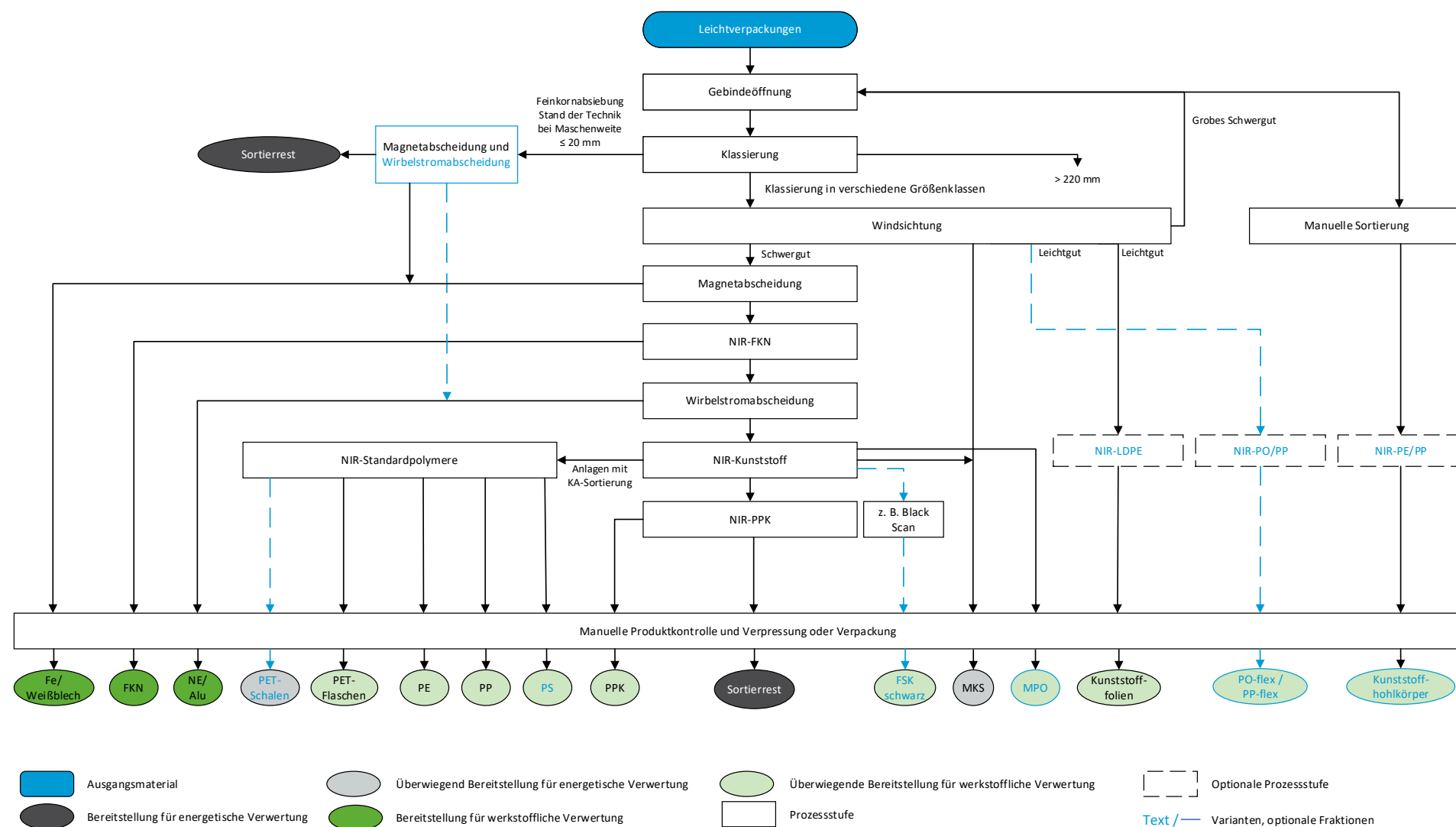
- ▶ Anlagen mit Kunststoffartensortierung (KA-Sortierung), bei denen formstabile Kunststoffverpackungen, wie beispielsweise Flaschen, Schalen oder Dosen nach Polymerart (PP, PE, PET, ggf. PS) getrennt werden;
- ▶ Anlagen ohne KA-Sortierung. Diese Anlagen haben in den meisten Fällen geringere Durchsätze als Anlagen mit KA-Sortierung;
- ▶ Anlagen mit einer Sortierung auf formstabile Kunststoffe (FSK);
- ▶ Anlagen mit integrierter Aufbereitung, bei denen die Sortierung, Aufbereitung und Verwertung in einer gemeinsamen Anlage stattfindet (Dehoust et al., 2021). Die Erhebung zeigt, dass es nur wenige operativ tätige Anlagen gibt, die mit integrierter Aufbereitung arbeiten. In Bezug auf die Mengenrelevanz spielt die integrierte Aufbereitung nur eine untergeordnete Rolle.

Zusätzlich kann noch die Kategorie der Anlagen zur Störstoffentfrachtung genannt werden, bei denen Störstoffe aus der LVP-Sammlung abgetrennt werden und ein Werkstoffkonzentrat bereitgestellt wird. Dieses Werkstoffkonzentrat wird anschließend in nachgeschalteten Sortieranlagen über KA-Sortierung weitersortiert. Diese Anlagen sind deshalb im Folgenden unter der Kategorie KA-Sortierung inkludiert. In Bezug auf die Mengenrelevanz spielen die Anlagen zur Störstoffentfrachtung nur eine untergeordnete Rolle.

Abbildung 5 stellt die übliche Reihenfolge der Prozesse sowie die Fraktionen bei der LVP-Sortierung dar. Im Folgenden werden die einzelnen Sortierschritte erläutert. Die Angaben basieren auf den Aussagen der LVP-Sortierer in den Erhebungsbögen und in den ausgefüllten Fragenkatalogen. Als Grundlage der Erläuterung und der Reihenfolge der Prozesse dienten die VDI-Richtlinie 2095 (2019) (Fachbereich Umweltschutztechnik, 2019), UBA-TEXTE 11/2021 (Dehoust et al., 2021), der Anforderungs- und Bewertungskatalog von cyclos-HTP in der Version 5.1 (Institut cyclos-HTP GmbH, 2022), der Bericht UBA-TEXTE 92/2021 (Knappe et al., 2021) sowie der Teilbericht UBA-TEXTE 125/2022 (Grummt, 2022).

³ <https://www.gruener-punkt.de/de/download.html>.

Abbildung 5: Schematische Darstellung über den Stand der Praxis der LVP-Sortierung



Quelle: eigene aktualisierte Darstellung nach Grummt (2022), Umweltbundesamt, auf methodischer Grundlage von Dehoust et al. (2021)

- ▶ Im ersten Schritt werden die Müllbeutel- und -säcke (beispielsweise auch Gelber Sack) in der Gebindeöffnung mechanisch aufgeschossen. Damit werden die Verpackungsabfälle freigelegt.
- ▶ Anschließend läuft das Sammelgemisch über Siebmaschinen, bei denen die Verpackungen in verschiedene Größenklassen aufgetrennt werden. Dieser Prozess wird als Siebklassierung bezeichnet. Die Trennung nach der Größe dient einer effizienteren Sortierung der Fraktionen und erfolgt i. d. R. mit Trommelsieben. Die Feinkornabsiebung in den LVP-Sortieranlagen kann zusätzlich über Schwingsiebe durchgeführt werden. Stand der Technik ist dabei aktuell eine Maschenweite von ≤ 20 mm (Gespräch mit Hr. Dr. Christiani am 22.03.2023). Bei Anlagen mit einer feineren Maschenweite sind nicht-metallische kleinstückige Verpackungen sortierfähig. Verschmutzungen, wie Glassplitter oder Steine, die den Sortierprozess erschweren können, werden ausgesiebt. Für die Feinkornabsiebung bei 20 mm ist dafür weiterhin die Kombination aus Trommelsieb und Schwingsieb mit Langlochmasche von ca. 20 mm x 40 mm (Gespräch mit Hr. Dr. Christiani am 22.03.2023) im Einsatz. Im vorliegenden Teilbericht 2 wird diese Sortierprozessvariante erstmalig nicht mit der Maschenweite 30 mm zusammengefasst. Im Gegensatz dazu werden bei Anlagen mit einer gröberen Maschenweite kleinstückige nicht-metallische Verpackungen dem Wertstoffstrom entzogen (Wertstoffverlust). Das abgesiebte Material wird in fast allen Anlagen noch einer Magnetabscheidung unterzogen. Bei etwa der Hälfte der Anlagen durchläuft das abgesiebte Material zusätzlich eine Wirbelstromabscheidung. In wenigen Anlagen wird das abgesiebte Material zusätzlich zur Magnet- und Wirbelstromabscheidung noch Trennaggregaten mit Nah-Infrarot (NIR)-Spektroskopie-Sensoren (im Folgenden als „NIR-Trenner“ bezeichnet) zugeführt. Der übrige Sortierrest wird ausgeschleust und energetisch verwertet.
- ▶ Kunststofffolien (überwiegend aus LDPE) werden entweder konventionell über Windsichtung als Leichtgut oder in einigen Anlagen zusätzlich über NIR-Trenner aussortiert. Zur Unterstützung der Abtrennung von Folien sind auch ballistische Separatoren im Einsatz, in denen Schwer- und Leichtfraktion voneinander getrennt werden können. Die Verpackungen können nach den Kriterien 2D und 3D bzw. schwer-rollend und flach-leicht voneinander separiert werden (Bilitewski & Härdtle, 2013, S. 500). Sehr vereinzelt sind auch noch alternative Verfahren im Einsatz. Eine frühzeitige Separation von Folien beugt Verstopfungen im Prozess vor und verbessert die Reinheit und Ausbeute der Folien (Knappe et al., 2021). Über Windsichtung erfolgt der Siebschnitt üblicherweise bei großformatigen Folien > 220 mm (ca. > DIN A4). NIR-Trenner ermöglichen es, Kunststofffolien auch in kleineren Formaten (ca. < DIN A4) auszusortieren. Für Blasfolienanwendungen müssen die PP-Anteile in den Folienfraktionen so weit wie möglich reduziert werden bzw. die Fraktion eine besonders große Reinheit an LDPE aufweisen (Schmitz, 2019). Da NIR-Trenner eine Materialdetektion ermöglichen, können dabei z. B. PP-, HDPE- (High Density Polyethylen) sowie Verbundfolien aussortiert werden. In einigen Anlagen wird darüber hinaus die Fraktion PO (Polyolefin)-flex (323-2) über NIR-Trenner sortiert. Diese Fraktion bildet eine Mischung aus verschiedenen hauptsächlich flexiblen PO-Kunststoffverpackungen (z. B. PP-Folien, PO-basierte Verbundfolien). Werden PP-Folien über NIR-Trenner aus der LDPE-Folien-Fraktion aussortiert, können sie der PO-flex-Fraktion zugeführt werden. Im umgekehrten Fall können auch LDPE-Folien aus der PO-flex-Fraktion der LDPE-Folien-Fraktion zugeordnet werden (Institut cyclos-HTP GmbH, 2022). Die aktuelle Befragung der LVP-Sortieranlagen zeigt, dass wenige Anlagen auch PP-Folien und flexible PP-Verpackungen als Monofraktion mittels NIR-Trenner aussortieren (PP-flex). In einzelnen Anlagen werden Folien noch manuell abgetrennt.

- ▶ Im Anschluss daran wird das Sammelgemisch einer Magnetabscheidung unterzogen, bei der ferromagnetische Verpackungen mit Fe-Metall-Bestandteilen separiert werden. Dazu gehören beispielsweise Kronkorken, Weißblechdosen und Kombidosen. Dies erfolgt üblicherweise mittels Überbandmagneten (Institut cyclos-HTP GmbH, 2022).
- ▶ FKN werden in LVP-Sortieranlagen über NIR-Trenner aussortiert. Sehr vereinzelt gaben Anlagen an, die FKN-Fraktion manuell auszusortieren.
- ▶ NE-Metalle werden über Wirbelstromabscheidung aufgrund ihrer elektrischen Leitfähigkeit und des im Metall induzierten Magnetfelds aussortiert. Dazu gehören im Wesentlichen Aluminiumverpackungen (z. B. Dosen, Schalen, Tuben aus Aluminium) sowie Verbundverpackungen mit einer Barrierschicht aus Aluminiumfolie (ausgenommen sind Metallisierungen).
- ▶ Die Separierung der formstabilen Kunststoffverpackungen erfolgt in den LVP-Sortieranlagen üblicherweise mittels NIR-Trennern. Die Vereinzelung der Verpackungen spielt eine große Rolle bei der Erkennung über NIR-Trenner, da nur das Obermaterial identifiziert wird. Bei Verpackungen aus verschiedenen Materialien (z. B. Kunststoffbecher mit einer Pappbänderole) besteht ein Problem der Trennbarkeit, welches zur Folge hat, dass Materialien in falschen Fraktionen landen können (Knappe et al., 2021). Aus einer öffentlichen Quelle ist bekannt, dass derzeit in zumindest einer Anlage auch Kunststoff-Fraktionen nach Farbe sortiert werden (PreZero, 2022).
- ▶ Faserbasierte Verpackungen werden in der Regel als Fraktion 550 (PPK aus LVP) über NIR-Trenner separiert. Nur sehr vereinzelt wird die Fraktion 550 manuell sortiert.
- ▶ Nach einer manuellen Produktkontrolle und einer Verpackung bzw. Verpressung in Ballen und durch Bindedrähte werden die Fraktionen für die stoffliche Verwertung bereitgestellt. Sortierreste werden i. d. R. energetisch verwertet. Bei Vorhandensein von Trenneinheiten und umfangreicher sensorgestützten Sortierung in modernen LVP-Sortieranlagen wird die manuelle Sortierung auf das Mindeste beschränkt.

Abschließend ist festzuhalten, dass immer noch ähnliche Unterschiede wie bereits im Teilbericht 1 zwischen den LVP-Sortieranlagen bestehen. Die Anlagen unterscheiden sich weiterhin in der Maschenweite der Feinkornabsiebung, in der Sortiermethode (manuell oder automatisiert) sowie in den bereits genannten Fraktionen.

Sortierroboter und Künstliche Intelligenz (KI)-gestützte Objekterkennung können eine Alternative zur händischen Sortierung darstellen. Beispielsweise können sie für das Aussortieren von PE-Silikonkartuschen eingesetzt werden (Brunn, 2017; Knappe et al., 2021). Aus öffentlichen Quellen ist bekannt, dass Sortierroboter und KI-gestützte Objekterkennung bereits in LVP-Sortieranlagen im Einsatz sind (ALBA Group plc & Co. KG, 2019; Friedl, 2022b; PreZero, 2022; Thissen, 2022).

3.1.3 Ermittlung der Praxis der LVP-Sortierung

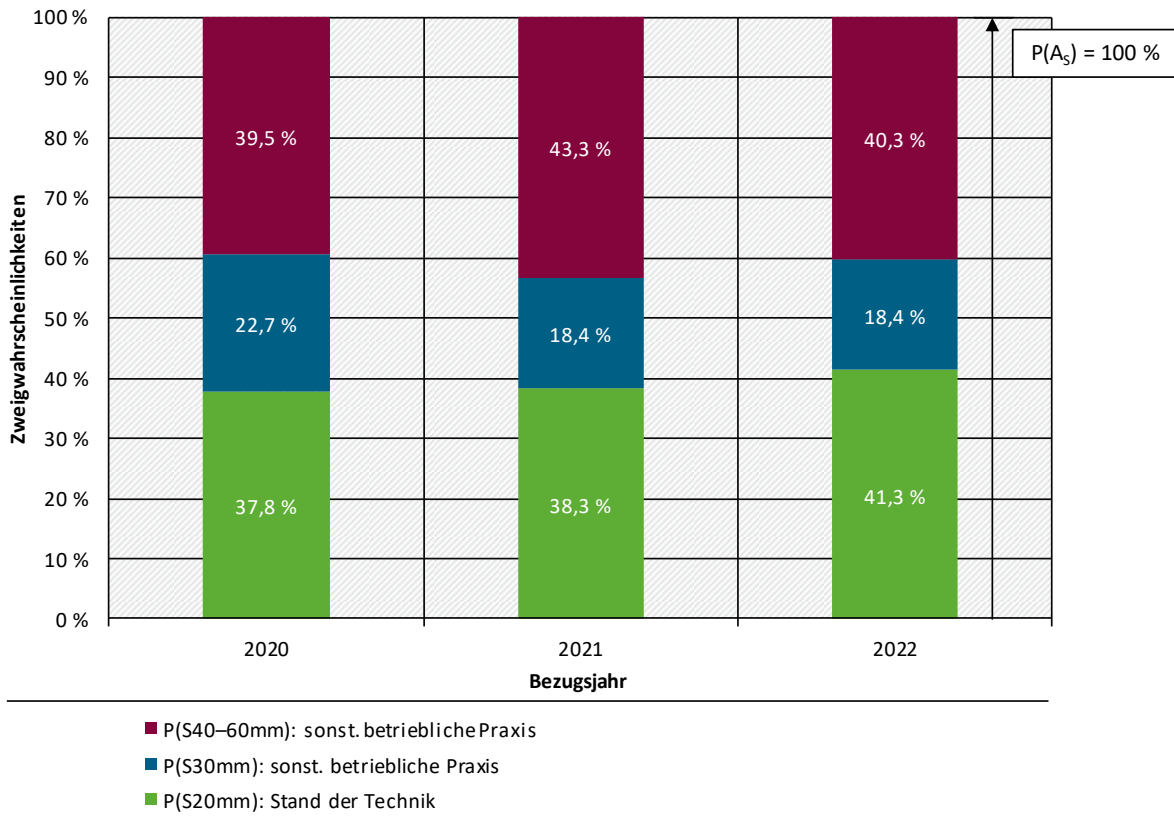
Im folgenden Abschnitt werden Erkenntnisse zur ermittelten Praxis der LVP-Sortierung erläutert und die Mengenrelevanz der Unterschiede zwischen den Anlagen verdeutlicht.

Maschenweite der Feinkornabsiebung

Nicht-metallische kleinstückige Verpackungen werden je nach Maschenweite der Feinkornabsiebung abgesiebt oder verbleiben im weiteren Prozess. In Abbildung 6 sind die Zweigwahrscheinlichkeiten der Sortierprozessvarianten der Feinkornabsiebung nach

Auswertung der Erhebungsbögen und des Fragenkatalogs dargestellt. $P(A_S)$ beträgt für 2020, 2021 (Grummt, 2022) und 2022 100 %, da alle LVP-Sortieranlagen eine Feinkornabsiebung durchführen.

Abbildung 6: Praxis der Sortierung für 2020 bis 2022 – Zweigwahrscheinlichkeiten der Sortierprozessvarianten der Feinkornabsiebung und Anwendungsgrad der Sortierung $P(A_S)$



Quelle: eigene Darstellung, Umweltbundesamt, auf methodischer Grundlage von Dehoust et al. (2021), Werte für 2020 und 2021 aus Grummt (2022)

Die Variante bei einer Maschenweite von ≤ 20 mm wird dabei als Stand der Technik angesehen (Gespräch mit Hr. Dr. Christiani am 22.03.2023), da bei dieser Variante das Schwingsieb mit Langlochmasche zum Einsatz kommt. Die Feinkornabsiebung für S20mm erfolgte im Jahr 2022 bei 41,3 % der LVP-Sammelmenge. Gegenüber 2020 ist die Zweigwahrscheinlichkeit $P(S20)$ um 3,5 Prozentpunkte angestiegen. Die Wahrscheinlichkeit, dass eine Verpackung über eine LVP-Sortieranlage mit Maschenweiten von 30 mm (S30) oder 40 mm – 60 mm (S40–60) i. d. R. über Trommelsiebe geführt wird, lag in 2020 bei insgesamt 62,2 %, in 2021 bei 61,7 % und in 2022 bei 58,7 %. Zusammenfassend ist festzustellen, dass weiterhin mehr als die Hälfte der LVP-Sammelmenge in Sortieranlagen mit feineren Maschenweiten (≤ 20 mm oder 30 mm) sortiert wird. Des Weiteren ist zu erkennen, dass sich die Mengen von 2020 zu 2021 um etwa 4 Prozentpunkte zu den größten Maschenweiten (S40–60) verschoben haben; in 2022 aber wieder bei einem ähnlichen Wert wie in 2020 liegen.

Durch Dehoust et al. (2021) wurde für 73,6 % der LVP-Gesamt-Verarbeitungsmenge eine Maschenweite von 20 mm oder 30 mm und für 26,4 % eine Maschenweite von 40 mm – 60 mm verzeichnet. Im Vergleich lässt sich in der aktuellen Auswertung für 2022 eine deutliche Verschiebung zu groben Maschenweiten 40 mm – 60 mm (S40–60) von ca. 14 Prozentpunkten gegenüber 2019 feststellen. Da keine gemeinsame Grundgesamtheit an LVP-Sortieranlagen für

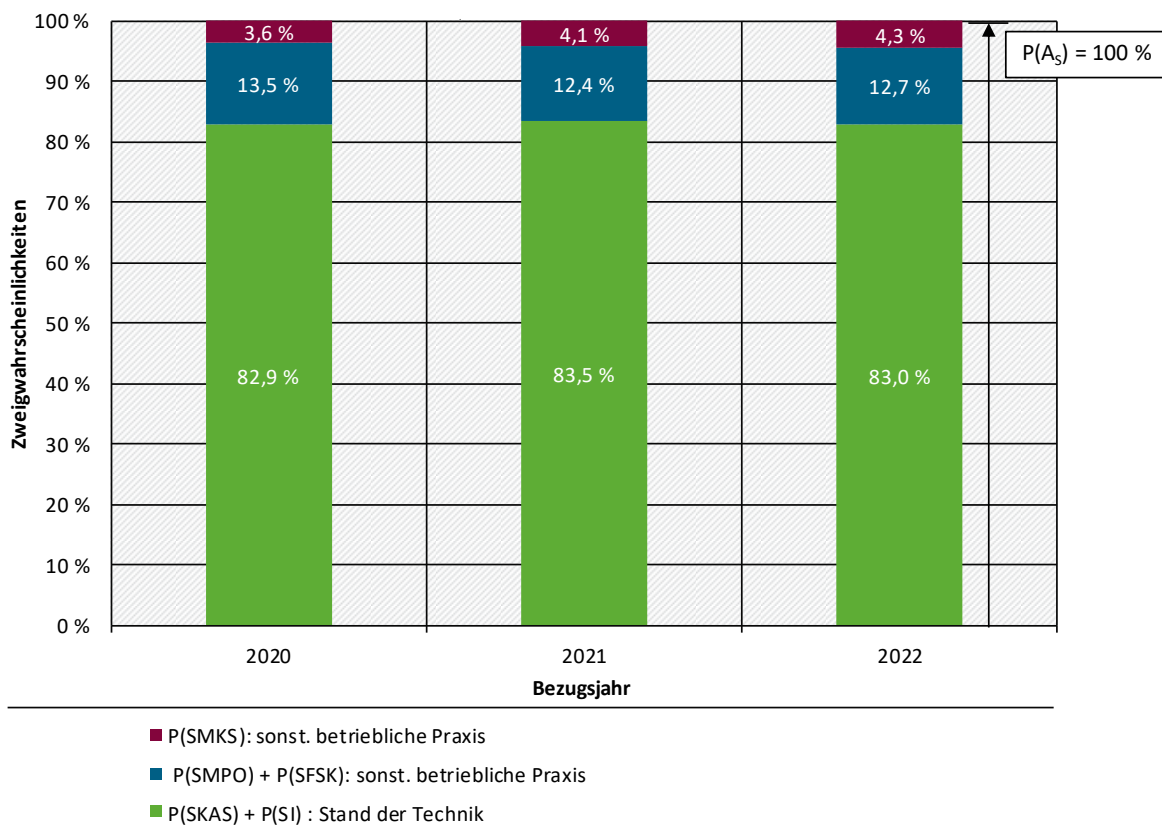
die Jahre 2019 gegenüber 2020/2021/2022 vorliegt, lassen sich die Wahrscheinlichkeiten nur bedingt miteinander vergleichen.

In dieser und der letzten Befragung wurde festgestellt, dass auch moderne Anlagen größere Maschenweiten verwenden. Teilweise stellten LVP-Sortierer die Feinkornabsiebung in den letzten Jahren um. Ein LVP-Sortierer gab im Zuge der letzten Erhebung als Grund für die Umstellung von feineren zu größeren Maschenweiten an, dass die kleinstückigen Verpackungen zu Fehlausträgen bei den NIR-Trennern führen. Der maschinelle Sortierprozess erleide durch die kleinstückigen Verpackungen Störungen. Ein anderer LVP-Sortierer nannte als Grund für die Umstellung auf größere Maschenweiten, dass die Hauptlinien von Störstoffen wie Knopfzellen, Batterien und kleinteiligen organischen Bestandteilen „entfrachtet“ würden. Dadurch erhöhe sich die Ausbringung und die Qualität in den Fraktionen. Der Nachteil der größeren Maschenweiten ist jedoch, dass kleinere Verpackungen dem Wertstoffstrom entzogen werden. Die Feinkornabsiebung sollte generell in zukünftigen Erhebungsbögen weiterhin abgefragt werden, um deren Entwicklung weiter zu beobachten und einzustufen.

Sortierung formstabiler Kunststoffverpackungen

Abbildung 7 stellt die Verteilung auf die Sortierkonzepte der formstabilen Kunststoffverpackungen für 2020 – 2022 dar (Werte für 2020 und 2021 aus Grummt, 2022). Aus wettbewerbsrechtlichen Gründen werden an dieser Stelle mehrere Zweigwahrscheinlichkeiten zusammengefasst. Etwas über 80 % der LVP-Sammelmengen wurden in den letzten drei Jahren über KA-Sortierung oder integrierte Aufbereitung erfasst (ohne Aussage zur Bildung einer PS-Fraktion 331). Diese Sortierprozessvarianten werden als SKAS und SI bezeichnet. Eine vollständige KA-Sortierung mit Betrachtung der PS-Fraktion 331 wurde für ca. 50 % der LVP-Sammelmengen in 2020 – 2022 eingesetzt. Die weiteren Sortierkonzepte wurden bereits im Abschnitt 3.1.2 beschrieben: MPO-Sortierung (SMPO) und FSK-Sortierung (SFSK). In Summe betragen die Pfadwahrscheinlichkeiten für die eben genannten zwei Sortierkonzepte für 2020 – 2022 ca. 13 %. Nur für ca. 4 % der LVP-Sammelmenge wurden in 2020 – 2022 formstabile Kunststoffe als Mischkunststoffe erfasst (SMKS). $P(A_S)$ beträgt für alle drei Jahre 100 %, da alle befragten LVP-Sortieranlagen formstabile Kunststoffverpackungen mit einer der genannten Varianten aussortieren.

Abbildung 7: Praxis der Sortierung für 2020 bis 2022 – Zweigwahrscheinlichkeiten der Sortierprozessvarianten formstabiler Kunststoffverpackungen und Anwendungsgrad der Sortierung $P(A_s)$



Quelle: eigene Darstellung, Umweltbundesamt, auf methodischer Grundlage von Dehoust et al. (2021), Werte für 2020 und 2021 aus Grummt (2022)

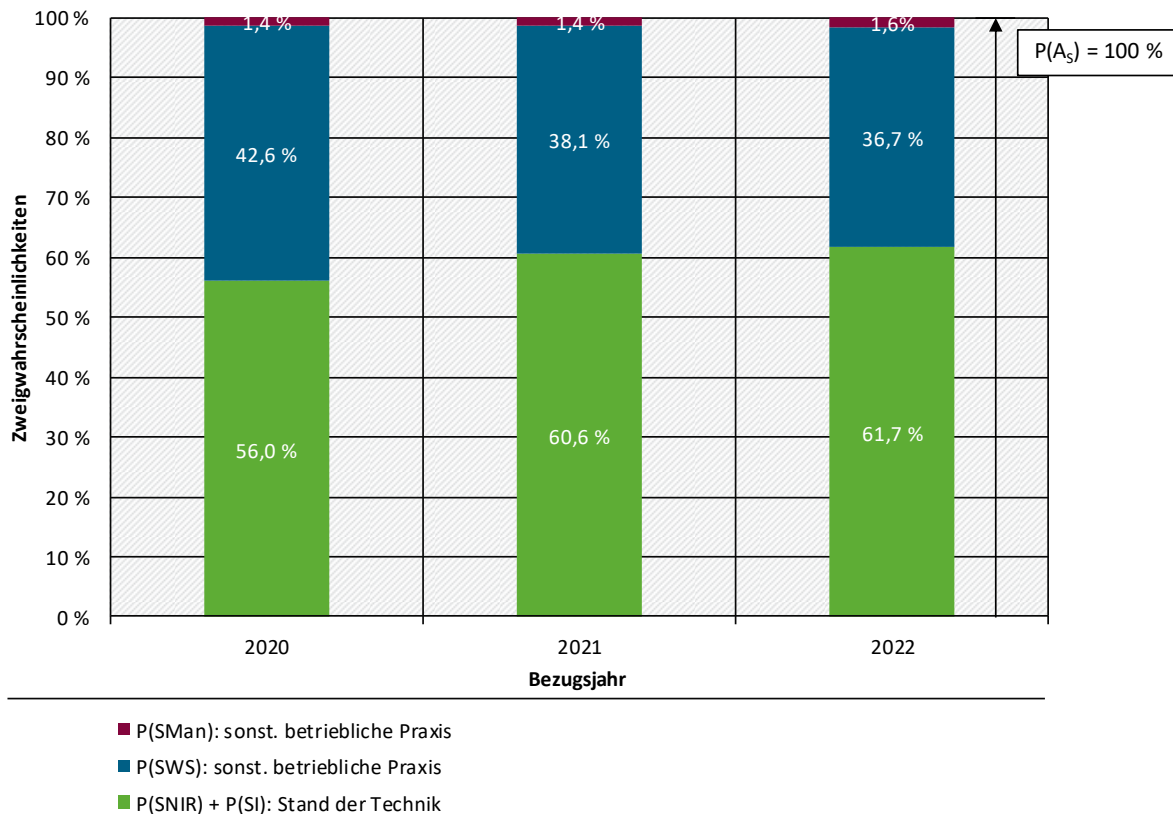
Sortierung flexibler Kunststoffverpackungen

Abbildung 8 zeigt die Unterschiede in der Anlagentechnik bei flexiblen Kunststoffverpackungen für 2020 – 2022 (Werte für 2020 und 2021 aus Grummt, 2022). Bei ca. 43 % (2020), 38 % (2021) und 37 % (2022) der LVP-Sammelmengen wurden Folien über Anlagen mit Windsichtung (SWS) separiert. In 2020 wurden ca. 56 %, in 2021 ca. 61 % und in 2022 ca. 62 % der LVP-Sammelmengen zusätzlich über NIR-Trenner (SNIR) oder integrierte Aufbereitung (SI) separiert. Die Zweigwahrscheinlichkeiten $P(\text{SNIR}) + P(\text{SI})$ haben demnach von 2020 gegenüber 2022 um etwa 6 Prozentpunkte zugenommen. Der Vorteil von NIR-Trennern ist zum einen die Materialidentifizierung auf LDPE-Folien und zum anderen die damit verbundene Format-Unabhängigkeit. Etwa bei der Hälfte der LVP-Sammelmengen der befragten Anlagen mit sensorbasierter Foliensortierung mittels NIR-Trenner wurden auch kleinformatige LDPE-Folien (< DIN A4) sortiert. Einige der Anlagen gaben an, zusätzlich zu den Folienfraktionen 310/310-1 die Fraktion PO-flex (323-2) zu sortieren. Die NIR-Trenner bei diesen Anlagen ermöglichen somit einerseits die Bildung einer LDPE-Monofraktion und andererseits die Sortierung von kleinformatigen Folien aus PE oder PP in die Fraktion PO-flex (323-2). In 2022 gab es zudem einige LVP-Sortieranlagen, die flexible PP-Verpackungen und PP-Folien als Monofraktion sortierten und für ein Recycling bereitstellten. In anderen Anlagen werden kleinformatige Folien und Nicht-LDPE-Folien beispielsweise in die Mischkunststofffraktion einsortiert.

Die bereits genannten Vorteile der NIR-Trenner sind auch der Grund, warum der Pfad $P(\text{SNIR}) + P(\text{SI})$ als Stand der Technik-Pfad eingestuft wird. Zusätzlich zu den genannten Sortierverfahren

werden auch ballistische Separatoren eingesetzt, um Leicht- und Schwerfraktion zu trennen. Wenige Anlagen gaben an, dass Folien ausschließlich manuell aussortiert werden (SMan). $P(\text{SMan})$ liegt für 2020 und 2021 bei 1,4 % sowie für 2022 bei 1,6 %. $P(A_S)$ beträgt für alle drei Jahre 100 %, da alle befragten LVP-Sortieranlagen flexible Kunststoffverpackungen mit einer der genannten Varianten aussortierten.

Abbildung 8: Praxis der Sortierung für 2020 bis 2022 – Zweigwahrscheinlichkeiten der Sortierprozessvarianten flexibler Kunststoffverpackungen und Anwendungsgrad der Sortierung $P(A_S)$



Quelle: eigene Darstellung, Umweltbundesamt, auf methodischer Grundlage von Dehoust et al. (2021), Werte für 2020 und 2021 aus Grummt (2022)

Weitere Anwendungsgrade der Sortierung $P(A_S)$

In Tabelle 1 sind die Angaben zum $P(A_S)$ für die Bezugsjahre 2019 (Dehoust et al., 2021), 2020, 2021 (Grummt, 2022) und 2022 gegenübergestellt. Die Sortierung der Fraktion Kunststoffhohlkörper > 5 Liter (322), welche entweder manuell oder über NIR aussortiert werden, lag in den letzten vier Jahren bei ungefähr 50 % und hat in 2022 gegenüber 2019 um 4 Prozentpunkte abgenommen. Gegenüber 2019 ist in der aktuellen Auswertung für 2022 ein deutlicher Anstieg vom $P(A_S)$ der Fraktion PO-flex (323-2) von ca. 17 Prozentpunkten ersichtlich. Ein Grund dafür könnte sein, dass die Fraktion relativ neu ist und sich erst als Alternative zur Fraktion Mischkunststoffe etablieren musste. Bei der aktuellen Erhebung wurden die LVP-Sortierer zudem befragt, ob PP-flex als Monofraktion sortiert und für ein Recycling bereitgestellt wird. $P(A_S)$ für PP-flex beträgt hierbei > 10 % für 2022. Aus wettbewerbsrechtlichen Gründen kann die Zweigwahrscheinlichkeit mengenmäßig nicht als Klarwert angegeben werden.

Die Sortierung schwarzer Kunststoffe (351-5) als Monofraktion hat in 2022 gegenüber 2021 um ca. 2 Prozentpunkte abgenommen. Der Abnahme von 2019 gegenüber 2020/2021/2022 ist keine große Bedeutung beizumessen, da ein LVP-Sortierer auf Nachfrage mitgeteilt hat, dass für 2019 versehentlich eine Falschangabe gemacht wurde und die Fraktion 351-5 noch nie sortiert wurde. Ruß in Verpackungen führt dazu, dass das von den Sensoren der NIR-Trenner ausgesendete Licht absorbiert wird (Knappe et al., 2021; Nüssler, 2016). Eine materialspezifische Zuordnung in Kunststoffarten kann daher bei rußbasierten Verpackungen üblicherweise nicht gewährleistet werden. Nur wenige LVP-Sortieranlagen besitzen spezielle Techniken, z. B. erweiterte IR-Techniken (Friedl, 2022b), um schwarz eingefärbte Kunststoffe als einzelne Fraktion auszusortieren. Bei dieser Fraktion handelt es sich i. d. R. um ein Gemisch verschiedener Kunststoffsorten sowie auch anderer schwarzer Objekte (Knappe et al., 2021). Es gibt jedoch mittlerweile schwarze Farbstoffe, die nicht auf Ruß basieren und eine NIR-Detektion ermöglichen können (Gürlich et al., 2022).

PS wurde in den letzten Jahren in den LVP-Sortieranlagen über verschiedene Fraktionen aussortiert (331, 351-X oder über integrierte Aufbereitung). $P(A_S)$ von PS lag in 2022 bei 67 %. In den letzten drei Jahren wurde für PS ein geringfügiger Anstieg um 3 Prozentpunkte verzeichnet.

$P(A_S)$ der Fraktion EPS (340) lag in den letzten vier Jahren bei 0 %. Aktuell laufen Pilotprojekte zur Sortierung und Bereitstellung von EPS in LVP-Sortieranlagen als Monofraktion. Bei Einbeziehung dieser Pilotprojekte beliefe sich $P(A_S)$ in 2022 auf < 5 %. EPS wird aktuell nicht über die LVP-Sortierung im industriellen Maßstab sortiert und verwertet. Es landet im Sortierrest und wird anschließend energetisch verwertet. Für EPS, welches separat und sortenrein über z. B. Wertstoffhöfe oder industrielle und gewerbliche Sammlungen gesammelt wird, besteht ein Recyclingpfad (Lindner et al., 2019).

Die Fraktionen Weißblech, Aluminium und FKN werden in allen LVP-Sortieranlagen sortiert und weisen infolgedessen $P(A_S)$ von 100 % auf. Für PPK aus LVP beträgt $P(A_S)$ in 2022 ca. 96 %. Einige LVP-Sortieranlagen gaben an, diese Fraktion teilweise einer werkstofflichen und teilweise einer energetischen Verwertung zuzuführen. In den letzten drei Jahren 2020 – 2022 wurde die Fraktion PPK aus LVP mit einer Zweigwahrscheinlichkeit von 0,2 % manuell sortiert.

Die Fraktion 328-5 wird nur von wenigen LVP-Sortieranlagen sortiert und einer werkstofflichen Verwertung zugeführt (siehe Tabelle 1). Der $P(A_S)$ der Fraktion ist in 2022 gegenüber dem Vorjahr um über 6 Prozentpunkte gesunken. Mehrere Anlagen, die Fraktion 328-5 ankreuzten, machten zudem die Aussage, dass die Fraktion nicht vollständig werkstofflich verwertet wird, sondern auch teilweise energetisch.

Insbesondere die Entwicklung der Sortierung von PS, PO-flex, PP-flex, PET-Schalen und der schwarzen Kunststoffe sollte über die kommenden Jahre weiterhin beobachtet werden. Verpackungen aus PC, PVC, PA, PLA, kompostierbaren Kunststoffen, Duroplasten, Elastomeren, Textilien, Keramik, Holz und anderen eben nicht genannten Kunststoffen werden in 2022 nicht in LVP-Sortieranlagen sortiert und für eine werkstoffliche Verwertung bereitgestellt. Es besteht demnach auch kein hochwertiger werkstofflicher Verwertungspfad.

Tabelle 1: Weitere Anwendungsgrade der Sortierung P(A_s) für 2019 bis 2022

Sortierfraktion und -verfahren	P(A _s) für 2019 in %	P(A _s) für 2020 in %	P(A _s) für 2021 in %	P(A _s) für 2022 in %
Kunststoffhohlkörper > 5 Liter (322) über NIR oder manuell	51,2	50,7	48,3	46,9
PO-flex (323-2) über NIR	17,0	28,7	30,5	33,6
PP-flex als Monofraktion (324-1/2) über NIR	-	-	-	> 10
PS (331 inkl. 351-X und integrierte Aufbereitung)	68,4	64,2	65,3	66,9
EPS (340) über NIR	0	0	0	0
Schwarze Kunststoffe (351-5) über BlackScan	19,0	10,4	14,6	12,8
Weißblech (410/412) über Magnetabscheidung	100	100	100	100
Aluminium (420) über Wirbelstromabscheidung	100	100	100	100
FKN (510, 512) über NIR oder manuell	NIR: 100 Manuell: 0	NIR: 99,8 Manuell: 0,2	NIR: 99,8 Manuell: 0,2	NIR: 99,8 Manuell: 0,2
PPK aus LVP (550) über NIR oder manuell	NIR: 97,1 Manuell: 2,9	NIR: 96,1 Manuell: 0,2	NIR: 95,5 Manuell: 0,2	NIR: 95,5 Manuell: 0,2
PET-Schalen (328-5) über NIR	11,6	17,1	16,1	< 10

Quelle: Werte für 2019 von Dehoust et al. (2021), Werte für 2020 und 2021 aus Grummt (2022)

3.1.4 Einstufung problematischer Verpackungsmerkmale bei der Trennung und Sortierung

Die letzte Erhebung für 2020/2021 bot den LVP-Sortierern die Möglichkeit, eine Einschätzung zur Relevanz problematischer Verpackungsmerkmale bei der Trennung, Identifizierung und Sortierung zu geben. Als Basis dafür dienten die im Anhang 2 des Mindeststandards 2021 aufgeführten „Verpackungsmerkmale, die eine Prüfung der Identifizierbarkeit in der sensorgestützten Sortierung durch Messung erfordern“ (ZSVR, 2021). Die Ergebnisse können im Teilbericht UBA-TEXTE 125/2022 (Grummt, 2022) eingesehen werden. Im Ergebnis war festzustellen, dass die Angaben aus dem Anhang 2 des Mindeststandards 2021 von den LVP-Sortierern überwiegend bestätigt wurden. Wir empfehlen daher alle bisherigen Angaben im Anhang 2 des kommenden Mindeststandards weiterhin aufzulisten.

Bei der aktuellen Befragung der LVP-Sortierer bestand wiederholt die Möglichkeit, kritische Verpackungen anzugeben, die eine Sortierung oder Trennung erschweren können. Die Ergebnisse sind in Tabelle 2 aufgelistet.

Tabelle 2: Problematische Verpackungsmerkmale bei der Trennung und Sortierung (Gesamtanzahl an LVP-Sortieranlagen mit ausgefülltem Fragenkatalog: 37)⁴

Problematische Verpackungsmerkmale	Anzahl
Fehlwürfe im Gelben Sack, besonders in Form von Lithium-Ionen-Akkus welche ein hohes Sicherheitsrisiko darstellen (Brandgefahr), schlecht sortierbar sind und zusätzlich hohe Kosten in der Entsorgung mit sich bringen. Angabe einer Anlage: Batterien (Funken und Brandgefahr) seien ein Problem; pro Schicht mindestens 2-3 Signalauslöser an der Funken- und Branderkennungsanlage; bedeutet im 3-Schichtbetrieb (6-Tage-Woche) ca. 1.500-1.800 Auslöser pro Jahr.	7
PE-Silikonkartuschen: Aufgrund von Produktresten in der Kartusche problematisch in der Verwertung, deshalb manuelle Aussortierung oder Nachrüstung von NIR-Technik zur Aussortierung von PE-Kartuschen erforderlich.	8
Trennbare Verpackungen (bspw. Joghurtbecher mit Papierummantelung und Aluminiumdeckel), die vom Abfallerzeuger nicht getrennt werden, was eine großtechnische Anlage aber nicht nachträglich trennen kann; Verpackungen werden falsch oder nicht korrekt erkannt und nicht korrekt aussortiert; Joghurtbecher mit Papierbanderole können in der Fraktion 550 anstatt in der 324/331 landen.	9
Multilayer sind immer wieder ein Problem; je nachdem welche Seite bei eingesetzter Technik "oben" liegt, wird der korrekte Kunststoff/die korrekte Materialfraktion erkannt oder nicht.	7
Aluminiumbedampfte Folien oder Getränkebeutel sind als Bestandteil der Aluminiumfraktion nicht verwertbar (auch nicht in der Pyrolyse) und auch nicht in der Folienfraktion; dort müssen sie mit unverhältnismäßigem Aufwand wieder im Prozess abgeschieden werden.	1
Full-Sleeve-Verpackungen bei PET-Flaschen; Sleeve ist i. d. R. aus anderem Material (nicht PET) womit die Gefahr besteht, dass das PET nicht erkannt und damit nicht richtig aussortiert wird.	7
Produkte aus aufgeschäumtem PE (bspw. Badeschuhe) als stoffgleiche Nichtverpackung bereiten bei der weiteren Verarbeitung (Wäsche und Extrusion) Probleme in der Herstellung von Granulaten; diese lassen sich mittels NIR und Dichtentrennung nicht von konventionellem PE unterscheiden.	7
Runde rollende Verpackungskörper kommen auf den Förderbändern später zum Liegen; dies führt dazu, dass die eingesetzte NIR-Technik runde Körper zwar erkennt, aber aufgrund der geänderten Position (im Vergleich zur Erkennung) nicht korrekt mittels Druckluft ausschleusen kann.	7
Kunststoffbestandteile < 20 mm werden i. d. R. nicht mechanisch aussortiert; in dieser Korngröße werden nur noch Metalle abgeschieden.	7
Dunkle Kunststoffe (nicht nur schwarze Kunststoffe) werden von älterer NIR-Technik schwerer erkannt; eine vorzeitige Erneuerung von NIR-Technik ist notwendig, obwohl diese zum Teil noch nicht abgeschrieben ist (wettbewerbsnachteilig); verstärkter Trend zu schwarzen Verpackungen (z. B. High Protein Produkte) verschlechtert Sortierbarkeit; schwarze	9

⁴ Problematische Verpackungsmerkmale, die von verschiedenen Anlagenbetreibern genannt wurden, aber sich einer gemeinsamen Problematik zuordnen lassen, wurden zusammengefasst.

Problematische Verpackungsmerkmale	Anzahl
Kunststoffe werden bis heute mit NIR Technik nicht erkannt; Anlagen, die schwarze Kunststoffe ausschleusen arbeiten nach dem Ausschlussprinzip.	
Verbundverpackungen (Kunststoffarten, PET/PE und Aluminium) und Hartkunststoffe mit Folien aus anderen Kunststoffen.	6
Multilayer-Kunststoffverpackungen.	5
Lichtschutz-Sleeves (innen schwarz) oder Sleeves mit Alu-Bedampfung.	2
Schichtfolien (PET-Verpackungen).	5
PPK aus LVP und sonstige Verbunde werden qualitativ schlechter (komplizierter im Aufbau, damit schlechter trennbar, höheres Gewicht als vergleichbare Verpackung aus PE, PP) und sind kaum noch zu vermarkten; die Umstellung auf diese Verpackung ist aus Recyclingsicht nicht sinnvoll; für die Fraktion PPK-Verbunde ist die stoffliche Verwertung, wenn überhaupt, nur gegen hohe Zuzahlung möglich; aktuelle dürfte die Kapazität zur stofflichen Fraktion bei ca. 50 % der aussortierten Menge und zur Quotenerfüllung erforderlichen Menge liegen; PPK-Verbundverpackungen werden vermehrt eingesetzt.	4
Der Trend zur Wertstofftonne mit stoffgleichen Nichtverpackungen verschlechtert den Input drastisch; die Sortierleistung sinkt (mehr Verstopfungen, Verwicklungen, ungeplante Anlagenstillstände); die Output-Produkte werden dadurch auch verschlechtert.	1
Helium-Ballongasflaschen werden von den Metallverwertern als Gasdruckbehälter eingestuft und die Übernahme abgelehnt oder nur gegen Maluskosten angenommen.	1
Netzförmige Verpackungen (z. B. für Kartoffeln, Zwiebeln, Weihnachtsbäume oder Mandarinen); kein sauberer Austrag mittels NIR-Trenner möglich; Betriebsstörungen (Blockieren, Kurzschluss, Überhitzung, Durchbrennen), da sie sich um die Antriebsrollen der Förderbänder wickeln.	2
Spraydosen; Restinhalte bzw. Treibgase bedingen Explosions- und Brandgefahr beim Verpressen.	1
Sorge um Substitution von gut recycelbaren PE-HD, PP oder PS-Verpackungen durch PET Schalen oder opake Flaschen.	2

Quelle: Tabelle basierend auf der aktuellen Erhebung, auf methodischer Grundlage von Dehoust et al. (2021)

Die genannten Aspekte lassen sich in drei Kategorien einordnen:

- Punkte, die im Expertenkreis III (EK III) eingebracht werden könnten:
 - Wir empfehlen die Aufnahme von „Lichtschutz-Sleeves (innen schwarz)“ bzw. „Sleeves mit Alu-Bedampfung“ im EK III zu beraten. Diese Art von Sleeves könnten dazu führen, dass NIR-Trenner die darunterliegende Verpackung nicht korrekt identifizieren können. Im Konsultationsentwurf des Mindeststandards wurde bereits „ohne Lichtbarriere“ unter „Fullsleeve-Etikettierung (Ausnahme: Fullsleeves ohne Lichtbarriere von PET-Hohlkörpern“ ergänzt (ZSVR, 2023a).

- Die qualitative Verschlechterung der Fraktion PPK aus LVP („komplizierter im Aufbau, damit schlechter trennbar, höheres Gewicht als vergleichbare Verpackung aus PE, PP“) und zunehmende Substitution von Kunststoffverpackungen zu faserbasierten Lösungen ist bereits Diskussionsthema im EK III.
 - Die Problematik der Gasdruckflaschen wurde bereits im Teilbericht 1 (Grummt, 2022) diskutiert und in den EK III eingebracht.
 - Die Problematik „Runde rollende Verpackungskörper“ wurde von 7 LVP-Sortieranlagen genannt und könnte in der kommenden Saison in den EK III eingebracht werden. Die Verpackungskörper kommen laut der Anlagenbetreiber später auf den Förderbändern zum Liegen, was dazu führen kann, dass die NIR-Trenner runde Körper zwar erkennen, aber aufgrund der geänderten Position (im Vergleich zur Detektion) nicht korrekt mittels Druckluft ausschleusen können.
- Aspekte, welche für den Mindeststandard keine Relevanz haben bzw. kein Handlungsbedarf gesehen wird, z. B.
- Lithium-Ionen-Akkus, da sie i. d. R. keine Bestandteile von systembeteiligungspflichtigen Verpackungen, sondern einen Fehlwurf darstellen.
 - Der 3-Komponenten-Becher (Kunststoffbecher, Aluminiumplattine und Kartonbänderole) muss sortenrein getrennt werden, damit alle Bestandteile werkstofflich verwertet werden können. Dass Verpackungskomponenten trennbar sein müssen, wenn dies für eine hochwertige werkstoffliche Verwertung notwendig ist, ist bereits im Mindeststandard 2022 aufgeführt. Der Mindeststandard enthält Instruktionen zur Bemessung von Kombinationsverpackungen, die eine gemeinsame Betrachtung erfordern, wenn die Komponenten nicht zwingend getrennt anfallen. Die Becher aus drei Komponenten wären gemäß Mindeststandard demnach nicht getrennt zu bemessen, da sie nicht „zum Ge- und Verbrauch notwendigerweise und unwiderruflich getrennt werden müssen“ (ZSVR, 2022, S. 4). Es besteht demnach kein Handlungsbedarf für den Mindeststandard.
- Verpackungsmerkmale, die bereits im Mindeststandard 2022 enthalten sind, z. B.
- „Netze“, „Dunkle Farbgestaltung unter Verwendung rußbasierter Pigmente (auch bei Verwendung in innenliegenden Layern)“, „unterschiedliche Kunststoffarten auf Vorder- und Rückseiten“ sowie „Multilayer-Aufbau (außer PE-/ PP-EVOH)“ im Anhang 2 des Mindeststandards 2022 (ZSVR, 2022).
 - „Kartuschen für Dichtmassen“ in Spalte 5 (Verpackungen / Materialien außerhalb der Spezifikation) im Anhang 1 des Mindeststandards 2022 (ZSVR, 2022).

3.2 Verwertung von Kunststofffolien

3.2.1 Rücklauf der Erhebung

An insgesamt 50 Verwerter von Kunststofffolien wurden Erhebungsbögen in zwei Erhebungen versendet. Mit 33 ausgefüllten Erhebungsbögen wurde eine Rücklaufquote von 66 % erreicht. Für Verwerter von Kunststofffolien mit Standort in Deutschland wurde eine Rücklaufquote von 85 % erzielt. Die Gesamtzuführungsmenge der Verwertungsanlagen aus den MSN 2021, die einen Erhebungsbogen zurücksendeten, liegt für Kunststofffolien in 2021 bei ca. 220.000 t (gerundet auf 1.000 t/a). Damit wurden 85 % der Gesamtzuführungsmenge aller Verwerter von

Kunststofffolien aus dem MSN 2021 abgedeckt. Dieser abgedeckte Mengenanteil liegt über 70 % der Gesamtzuführungsmenge und wird damit als repräsentativ angesehen.

Berücksichtigt wurden ausschließlich Letztempfängeranlagen und die Fraktionen 310 und 310-1. Die Fraktionen 323-2 (PO-flex) und 324-2 (PP-flex) sind an dieser Stelle nicht mit betrachtet.

Die Angaben der einzelnen Anlagen werden zum Schutz von Betriebs- und Geschäftsgeheimnissen und aus wettbewerbsrechtlichen Gründen vertraulich behandelt und nicht veröffentlicht.

Erhebungsbogen Kunststofffolien-Verwerter

- ▶ Rücklaufquote: im In- und Ausland: 66 % (33/50); im Inland: 85 % (23/27)
- ▶ Gesamtzuführungsmenge der Verwerter, die Erhebungsbögen zurücksendeten, aus MSN 2021: ca. 220.000 t; entspricht 85 % der Gesamtmenge aller Folienverwerter i. H. v. ca. 260.000 t (Datenübermittlung ZSVR an UBA am 24.11.2022; Mengen gerundet auf 1.000 t/a)

3.2.2 Pfadbeschreibung

Abbildung 9 zeigt die Pfadbeschreibung für die Sortierung und Verwertung von Kunststofffolien. Sie werden im Abschnitt 3.4 separat berücksichtigt und sind in den hier aufgeführten Mengen nicht enthalten.

Als Grundlage der Erläuterung und der Reihenfolge der Prozesse dienten die beiden Erhebungen zur Ermittlung der Praxis der SuV, die Publikation UBA-TEXTE 11/2021 (Dehoust et al., 2021) sowie der Anforderungs- und Bewertungskatalog von cyclos-HTP in der Version 5.1 (Institut cyclos-HTP GmbH, 2022).

Die Fraktion Kunststofffolien (310, 310-1) wird in den LVP-Sortieranlagen über Klassierung und Windsichtung (S1) abgetrennt und für die Verwertungsanlagen als Großballen bereitgestellt. Die Größe der Folien beträgt dabei üblicherweise ca. > DIN A4. Mittels NIR-Trenner (S2) werden von vielen Anlagen auch kleinformartige LDPE-Folien (ca. < DIN A4) sortiert.

Nach der Abtrennung des Bindedrahtes werden die Kunststofffolien zu Mahlgut zerkleinert. In der trockenmechanischen Aufbereitung über Windsichtung und Metallabscheider werden lose Verunreinigungen abgetrennt (z. B. Papier, Fe-, NE-Metalle). In einigen Verwertungsanlagen wird das zerkleinerte Mahlgut ebenfalls über einen NIR-Trenner geführt, bei dem PP-Folien und Störstoffe abgetrennt werden (V2). Diese Vorsortierung wird durchgeführt, da der PP-Anteil die Qualität von LDPE-Folien negativ beeinflussen kann. Einzelne Anlagen gaben an, PP-Folien manuell auszusortieren. V1 umfasst Verwertungsanlagen, die keine NIR-Vorsortierung durchführen. V- umfasst alle Verwertungsanlagen von Kunststofffolien, die keine Referenzanlagen darstellen.

Anschließend folgt der Waschprozess, in dem Klebstoffreste, Papier und Etiketten und andere Störstoffe entfernt werden sollen. Die Wäsche wird bei den befragten Referenzanlagen hauptsächlich als Kaltwäsche ausgeführt. Heißwäsche⁵ spielt bei der Reinigung des Mahlgutes in Bezug auf die Mengenrelevanz eine untergeordnete Rolle. Aus wettbewerbsrechtlichen Gründen kann die Zweigwahrscheinlichkeit für Heißwäsche an dieser Stelle mengenmäßig nicht als Klarwert dargestellt werden. Bei Verfahren mit Heißwäsche werden Detergenzien eingesetzt. Bei Verfahren mit Kaltwäsche werden üblicherweise keine Detergenzien hinzugegeben.

⁵ Nach Austausch mit einem Experten wurde als Kriterium für die Heißwäsche eine Temperatur von ≥ 70 °C definiert (Gespräch mit Hr. Dr. Christiani am 27.03.2023).

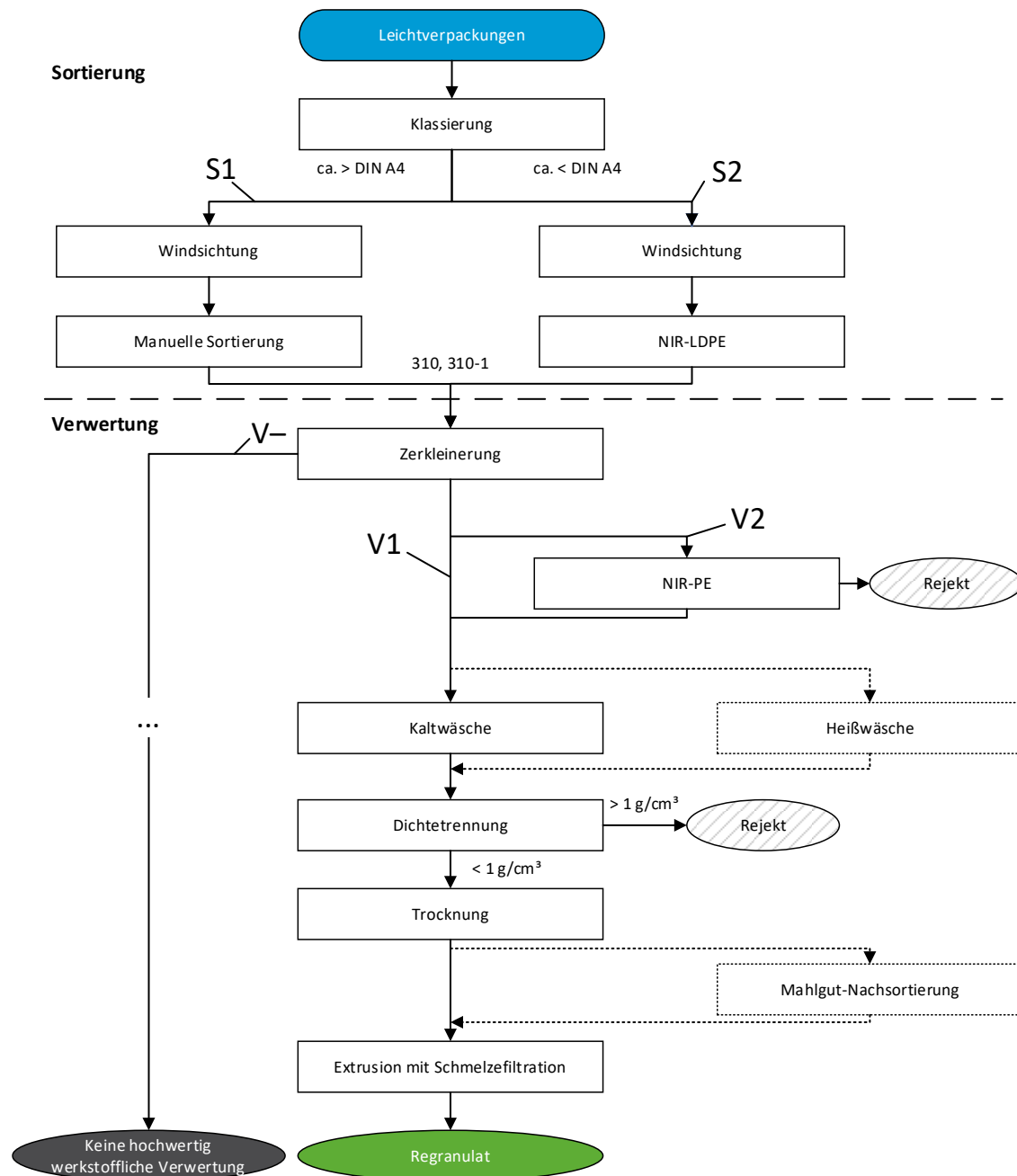
Die Dichtentrennung wird als Schwimm-Sink-Trennung über Verfahren wie Hydrozyklone bei einer Dichte von 1 g/cm^3 durchgeführt. Das Sinkgut wird als Rejekt abgetrennt. Dazu gehören beispielsweise Verpackungskomponenten aus PS, PET oder PVC (Tschachtli et al., 2019). Eine detaillierte Beschreibung der verschiedenen Technologien zur Dichtentrennung (Schwimm-Sink-Becken, Hydrozyklon, Zentrifuge) kann in UBA-Texte 92/2021 nachgelesen werden (Knappe et al., 2021). Das Schwimmgut wird anschließend getrocknet (mechanisch/thermisch).

Mahlgut-Nachsortierung zur stofflichen und farblichen Trennung von Mahlgut wird bei Folien mit untergeordneter Mengenrelevanz angewendet. Aus wettbewerbsrechtlichen Gründen kann dieses Verfahren mengenmäßig nicht näher beleuchtet werden.

Mittels Extrusion mit Schmelzefiltration wird das Mahlgut zu Regranulaten umgeschmolzen und als Verkaufseinheit bereitgestellt. Im Umschmelzprozess sind insbesondere die Bestandteile (z. B. Additive oder Blends) im Regranulat problematisch, die sich im Schmelzprozess zersetzen und eine geringere Schmelztemperatur gegenüber der Verarbeitungstemperatur (LDPE: ca. 105°C – 118°C) besitzen (Institut cyclos-HTP GmbH, 2022). Diese Bestandteile können eine Veränderung der Eigenschaften des finalen Rezyklats bedingen. Höher schmelzende Bestandteile können als Rückstand über Schmelzefiltration separiert werden. Nachteilig ist dabei der Aufwand für die Reinigung des Filtersiebes sowie der Ausbeuteverlust (Tschachtli et al., 2019).

Weitere Prozessschritte wurden von den befragten Anlagen nicht angegeben. In keiner der befragten Anlagen wurden lösemittelbasierte Verfahren im industriellen Maßstab für systembeteiligungspflichtige Verpackungen angewendet.

Abbildung 9: Schematische Darstellung der Pfadbeschreibung für die Sortierung und Verwertung von Kunststofffolien



Legende und Erläuterung

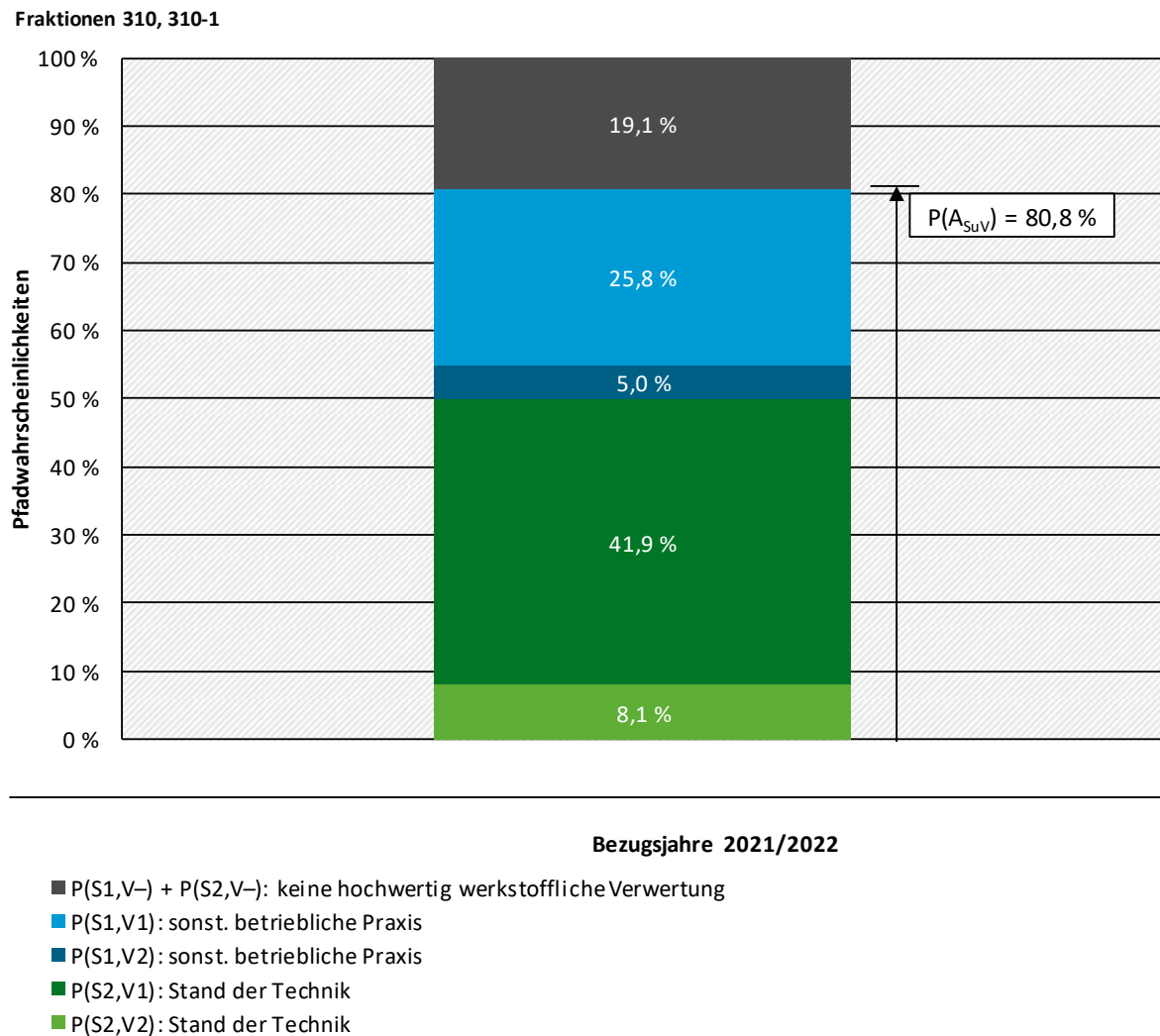
- Ausgangsmaterial
- Nebenprodukt (energetische Verwertung)
- Wahrscheinlichkeiten der Varianten werden nicht in die Anwendungsgrade einberechnet
- Hauptprodukt (hochwertige werkstoffliche Verwertung)
- Prozessstufe
- Geringe Mengenrelevanz der Zweigwahrscheinlichkeiten

Quelle: eigene aktualisierte Darstellung nach Grummt (2022), Umweltbundesamt, auf Grundlage von Dehoust et al. (2021)

3.2.3 Ermittlung der Praxis der SuV für Kunststofffolien

Aus den Verarbeitungsmengen der LVP-Sortierer für 2022, als auch aus den Verwertungszuführungsmengen aus dem MSN 2021, kann $P(A_{SuV})$ für Kunststofffolien berechnet werden. $P(A_{SuV})$ beträgt für die Bezugsjahre 2021/2022 in Summe 80,8 %. Die Verteilung der Mengen auf die in Abbildung 9 dargestellten Pfade ist in Abbildung 10 abgebildet.

Abbildung 10: Praxis der SuV für Kunststofffolien (Bezugsjahre 2021/2022)



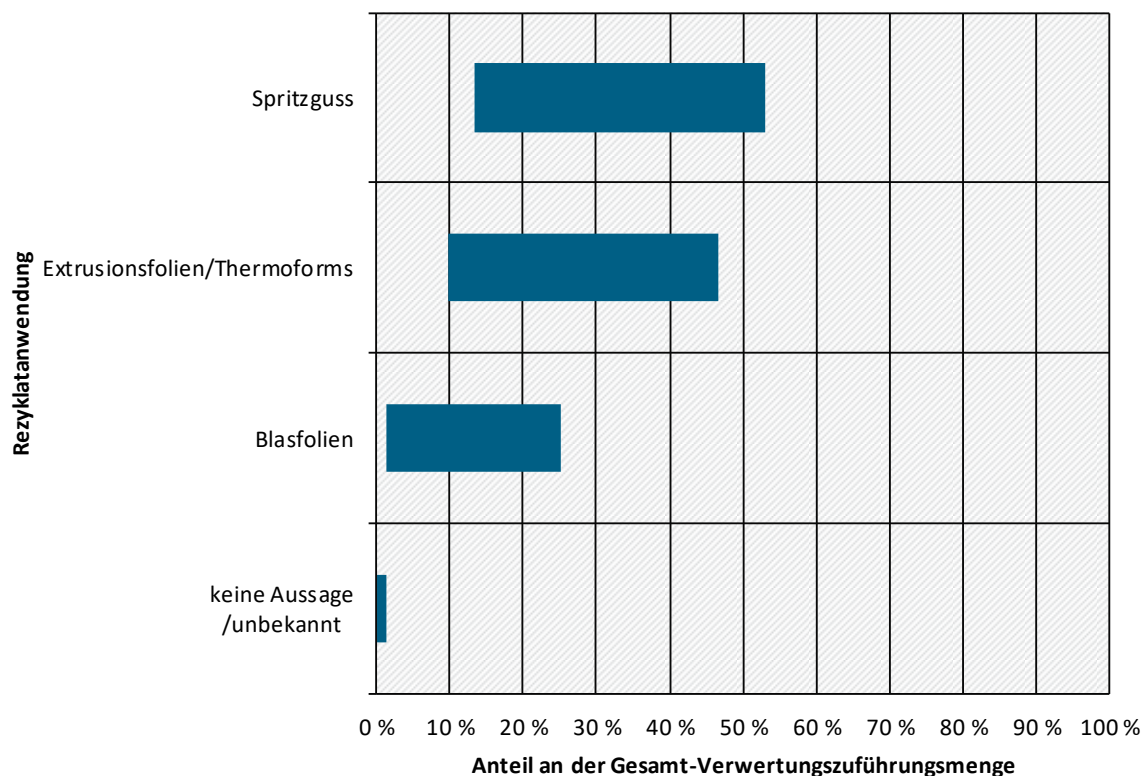
Quelle: eigene Darstellung, Umweltbundesamt, auf methodischer Grundlage von Dehoust et al. (2021)

Wie in Dehoust et al. (2021) und Grummt (2022) werden auch hier die Pfadwahrscheinlichkeiten mit Sortierprozessvariante S2 ($P(S2,V1)$ und $P(S2,V2)$) als Stand der Technik eingestuft. Bei diesen Pfadwahrscheinlichkeiten werden Folien bereits in der LVP-Sortieranlage über einen NIR-Trenner geführt und anschließend einer hochwertigen werkstofflichen Verwertung zugeführt. Dabei werden überwiegend auch kleinformatige Folien einbezogen. $P(S2,V1)$ beträgt 41,9 % und $P(S2,V2)$ 8,1 %. Die Wahrscheinlichkeiten mit S1 (Foliensortierung in der LVP-Sortieranlage nur über Windsichtung) wurden als sonstige betriebliche Praxis ermittelt. Dazu gehören $P(S1,V1)$ mit 25,8 % sowie $P(S1,V2)$ mit 5,0 %. Die Wahrscheinlichkeit, dass keine hochwertige werkstoffliche Verwertung stattfindet (Varianten mit V-), beträgt 19,1 %.

3.2.4 Rezyklatanwendungen

Abbildung 11 zeigt die von den Recyclern von Kunststofffolien angegebenen Verarbeitungsverfahren der Rezyklate (im Folgenden vereinfacht als „Rezyklatanwendung(en)“ bezeichnet). Von den Recyclern mit Referenzanlagen wurden überwiegend Spritzguss-, Extrusionsfolien/Thermoforms-, aber auch Blasfolienanwendungen angegeben. Durch die Überschneidung der Balken gestaltet sich die Abgrenzung der in Abbildung 11 dargestellten Anwendungen als schwierig. Eine Erfassung der Mengenverteilung auf die jeweiligen Anwendungen ist nicht erfolgt. Für zukünftige Erhebungen ist geplant, diese Informationen abzufragen. Einige der Anlagen, die Blasfolienanwendungen angaben, führen eine NIR-Vorsortierung auf PP-Folien durch. Produktbeispiele für Spritzgussanwendungen sind Mörtelimer, Müllbeutel für Blasfolienanwendungen und Rohre für Extrusionsanwendungen (Christiani, 2021).

Abbildung 11: Rezyklatanwendungen der Referenzanlagen (Bezugsjahr 2021) für die Verwertung von Kunststofffolien



Quelle: eigene Darstellung, Umweltbundesamt

3.2.5 Einstufung problematischer Verpackungsmerkmale bei der Verwertung

Die Erhebungen bot den Verwertern von Kunststofffolien die Möglichkeit, eine Einschätzung zur Relevanz problematischer Verpackungen und Komponenten zu geben, welche spezifische Probleme im Verwertungsprozess verursachen können. Die dazugehörigen Ergebnisse sind in Tabelle 3 dargestellt. Als Basis dafür dienten die im Anhang 3 des Mindeststandards 2021 aufgeführten Recyclingunverträglichkeiten (ZSVR, 2021, S. 29). Des Weiteren konnten zusätzliche Angaben (gelistet unter „Weitere Angaben“) zu problematischen Verpackungsmerkmalen gemacht werden. Diese konnten ebenso von den Verwertern hinsichtlich ihrer Relevanz eingeschätzt werden.

Tabelle 3: Einschätzung der Verwerter von Kunststofffolien zu problematischen Verpackungsmerkmalen (Gesamtanzahl Referenzanlagen: 23)⁶

Problematische Verpackungsmerkmale	Problem unbekannt	kein Problem	Problem nicht gelöst, aber aufgrund geringer Mengenrelevanz bedeutungslos	Problem bekannt, technisch		keine Angabe
				weitgehend gelöst	nicht gelöst	
Geklebte zellulosehaltige Etiketten, die sich unter den Bedingungen einer Kaltwäsche nicht ablösen lassen	1	3	5	6	7	1
PA-Schichten	2	1	1	5	11	3
PE-X-Komponenten	4	1	1	5	10	2
PVDC-Schichten	4	1	0	5	11	2
Sonstige Nicht-PE-Polymerschichten (außer Haftvermittler, Klebstoffe, PP, EVA, EVOH)	6	2	4	4	4	3
Nicht-Polymer-Schichten (außer SiOx / AlOx / Metallisierung)	3	3	6	4	4	3
Weitere Angaben:						
Schichtaufbau der Verbundfolien				1	1	
Nitrozellulose (nicht stabil, Gasbildung im Regranulat)					3	
Aluminiumfolie				1		
Druckfarben (Eintragsquelle für gefährliche Substanzen, z. B. polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe, Phthalate und Azo-Farbstoffe)					4	1
EVOH-, PVDC- Multilayer-Verbunde (nicht stabil, Gasbildung im Regranulat)					2	
Verpackung aus verschiedenen Materialien, die nicht zu 95 % Monomaterial enthält					1	
PVC-Klebeband					1	

⁶ Bei Mehrfachantworten einer Anlage wurde nur die Antwort mit der kritischeren Bewertung berücksichtigt.

Problematische Verpackungsmerkmale	Problem unbekannt	kein Problem	Problem nicht gelöst, aber aufgrund geringer Mengenrelevanz bedeutungslos	Problem bekannt, technisch		keine Angabe
				weitgehend gelöst	nicht gelöst	
PVC					1	
Biologisch abbaubare Folien					1	

Quelle: Tabelle basierend auf Grummt (2022) und der aktuellen Erhebung, auf methodischer Grundlage von Dehoust et al. (2021)

Es ist festzustellen, dass die Angaben im Anhang 3 überwiegend von den Verwertern bestätigt werden. Insbesondere PVDC (Polyvinylidenchlorid)-Schichten und PA (Polyamid)-Schichten sowie PE-X (vernetztes Polyethylen)-Komponenten wurden von etwa der Hälfte der Anlagenbetreiber als nicht gelöst betrachtet. Wir empfehlen, alle im Anhang 3 des Mindeststandards aufgelisteten Punkte weiterhin beizubehalten. Im Folgenden wird auf ausgewählte zusätzliche Angaben vertieft eingegangen:

- Druckfarben können die finale Qualität des Rezyklats negativ beeinflussen und sind eine Eintragsquelle für verschiedene Substanzen. Als Beispiele für schädliche Substanzen wurden Polyzyklische Aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK), Phthalate und Azo-Farbstoffe genannt. Zusätzlich wurde Nitrozellulose (Cellulosenitrat, umgangssprachlich als Nitrozellulose (NC) bezeichnet) genannt, welche laut EuPIA (Europäischer Druckfarbenverband, European Printing Ink Association) als Bindemittel-Polymer in Druckfarben für flexible Verpackungen verwendet wird und die Rezyklatqualität mindern kann (EuPIA, 2021). Die Initiative PrintCYC (Kaeding-Koppers, 2023) untersuchte Verpackungsfolien, welche mit NC-basierter Druckfarbe bedruckt wurden. Die Rezyklate wiesen keine zufriedenstellenden Qualitäten durch Farbveränderungen, unangenehmen Geruch und atemwegsreizende Ausgasungen auf (Kaeding-Koppers, 2023). Laut Kaeding-Koppers (2023) können thermostabile Bindemittel PU (Polyurethan) eine Alternative zu NC als Bindemittel in Druckfarben für das Recycling darstellen. In der Konsultationsversion des Mindeststandards 2023 sind „NC-basierte Druckfarben im Zwischenlagendruck“ im Anhang 3 des Mindeststandards als Recyclingfähigkeit bei „Folien und LDPE“ aufgenommen (ZSVR, 2023a, 2023b).
- Für Verpackungen aus PVC und biologisch abbaubaren Folien gibt es weder eine Sortierfraktion, noch einen Recyclingpfad. Diese Verpackungen gelten gemäß Mindeststandard 2022 als nicht recyclingfähig (ZSVR, 2022).

3.3 Verwertung von PP und PE

3.3.1 Rücklauf der Erhebung

An insgesamt 53 PP-Verwerter sowie an 66 PE-Verwerter im In- und Ausland wurden Erhebungsbögen in zwei Erhebungen versendet. Teilweise verarbeiteten Anlagen sowohl PP als auch PE. Mit 39 ausgefüllten Erhebungsbögen der PP-Verwerter und 44 der PE-Verwerter

wurden Rücklaufquoten von 74 % (PP) bzw. 67 % (PE) erreicht. Für PP- und PE-Verwerter mit Standort in Deutschland wurden Rücklaufquoten von 90 % (PP) bzw. 89 % (PE) erzielt. Die Gesamtzuführungsmenge der Verwertungsanlagen, die einen Erhebungsbogen zurücksendeten, liegt laut MSN 2021 für PP-Verwerter bei ca. 183.000 t und bei PE-Verwertern bei ca. 86.000 t (gerundet auf 1.000 t/a). Damit wurden 86 % (PP) bzw. 82 % (PE) der Gesamtzuführungsmenge aller PP- und PE-Verwerter aus dem MSN 2021 abgedeckt. Dieser abgedeckte Mengenanteil liegt über 70 % der Gesamtzuführungsmenge und wird damit als repräsentativ angesehen.

Berücksichtigt wurden ausschließlich Letztempfängeranlagen und die Fraktionen 324-X (PE), 329-X (PP), 351-X (formstabile Kunststoffe) und 323 (MPO). Die Fraktion 323-2 (PO-flex) ist an dieser Stelle nicht mit einbezogen und wird erst im Abschnitt 3.4 betrachtet. Die Fraktion 322 (Kunststoff-Hohlkörper) wird im Abschnitt 3.3.3 separat berücksichtigt und ist ebenso in den hier aufgeführten Mengen nicht enthalten.

Die Angaben der einzelnen Anlagen werden zum Schutz von Betriebs- und Geschäftsgeheimnissen und aus wettbewerbsrechtlichen Gründen vertraulich behandelt und nicht veröffentlicht.

Erhebungsbogen PP-Verwerter

- ▶ Rücklaufquote: im In- und Ausland: 74 % (39/53); im Inland: 90 % (28/31)
- ▶ Gesamtzuführungsmenge der Verwerter, die Erhebungsbögen zurücksendeten, aus MSN 2021: ca. 183.000 t; entspricht 86 % der Gesamtmenge aller PP-Verwerter i. H. v. ca. 212.000 t (Datenübermittlung ZSVR an UBA am 24.11.2022; Mengen gerundet auf 1.000 t/a)

Erhebungsbogen PE-Verwerter

- ▶ Rücklaufquote: im In- und Ausland: 67 % (44/66); im Inland: 89 % (32/36)
- ▶ Gesamtzuführungsmenge der Verwerter, die Erhebungsbögen zurücksendeten, aus MSN 2021: ca. 86.000 t; entspricht 82 % der Gesamtmenge aller PE-Verwerter i. H. v. ca. 105.000 t (Datenübermittlung ZSVR an UBA am 24.11.2022; Mengen gerundet auf 1.000 t/a)

3.3.2 Pfadbeschreibung

Abbildung 12 zeigt die Pfadbeschreibung für die Sortierung und Verwertung von formstabilen Verpackungen aus PP und PE. Als Grundlage der Erläuterung und der Reihenfolge der Prozesse dienen die beiden Erhebungen zur Ermittlung der Praxis der SuV, die Publikation UBA-TEXTE 11/2021 (Dehoust et al., 2021) sowie der Anforderungs- und Bewertungskatalog von cyclos-HTP in der Version 5.1 (Institut cyclos-HTP GmbH, 2022).

In manchen Anlagen werden aus Gründen der Produktqualität gewerbliche Abfallmengen oder auch Produktionsabfälle mitverarbeitet.

S1 (≤ 20 mm) und S2 (30 mm – 60 mm) kennzeichnen die zwei verschiedenen Sortierprozessvarianten und unterscheiden sich in der Maschenweite bei der Feinkornabsiebung in der LVP-Sortieranlage. S– umfasst die Anlagen, die PP und PE nicht aussortieren und für ein Recycling bereitstellen.

PP- und PE-Verpackungen werden über unterschiedliche Fraktionen in den LVP-Sortieranlagen über NIR-Trenner abgetrennt und für die Verwertungsanlagen als Großballen bereitgestellt. Die Verwertungsprozessvarianten V1 und V2 beschreiben Referenzanlagen. V– umfasst alle Verwertungsanlagen von PE und PP, die keine Referenzanlagen darstellen.

Nach der Abtrennung des Bindedrahtes werden die Verpackungen zu Mahlgut zerkleinert. In der trockenmechanischen Aufbereitung über Windsichtung und Metallabscheider werden lose Verunreinigungen abgetrennt (z. B. Papier, Fe-, NE-Metalle).

Anschließend folgt der Waschprozess mit dem Ziel, Klebstoffreste, Anhaftungen und Etiketten zu entfernen. Die Wäsche wird bei den befragten Verwertungsanlagen als Kaltwäsche ausgeführt (V1). Wenige Anlagen gaben an, das Mahlgut heiß zu waschen (V2). Eine Heißwäsche⁷ ermöglicht eine intensivere Reinigung der Mahlgutoberfläche (von z. B. Produktanhaftungen von Lebensmitteln und Kosmetik, Fetten, Etiketten, Klebstoffen) sowie eine Minderung der Gerüche. Um eine bessere Reinigungsleistung zu erzielen, wird das Waschwasser dabei auf eine bestimmte Temperatur erhitzt. Durch das Heißwaschen des Mahlguts kann die Qualität der Rezyklate verbessert und das Einsatzspektrum erweitert werden (Knappe et al., 2021). Die Mehrheit der PE- und PP-Verwerter gab an, dass die Wäsche ohne Zugabe von Natronlauge oder Detergenzien erfolgt. Da die Heißwäsche eine wichtige Prozessoperation zur Entfernung von Etikettenklebstoffen und Gerüchen darstellt, wird diese Variante in der Pfadbeschreibung dargestellt. Mengenmäßig kann diese Variante jedoch aus wettbewerbsrechtlichen Gründen nicht als Klarwert abgebildet werden.

Die Dichtentrennung wird als Schwimm-Sink-Trennung über Verfahren wie Schwimm-Sink-Becken bei einer Dichte von 1 g/cm^3 durchgeführt. Das Sinkgut wird als Rejekt ausgeschleust. Dazu gehören beispielsweise Verpackungskomponenten aus PS, PET oder PVC (Tschachtli et al., 2019), aber auch Holz, Gummi und Glas (Knappe et al., 2021). Zudem werden auch Kunststoffe abgetrennt, bei denen die Dichte durch Additive auf über 1 g/cm^3 erhöht wurde. PE und PP können aufgrund der geringen Dichteunterschiede in diesem Verfahren nicht voneinander getrennt werden (Tschachtli et al., 2019). Eine detaillierte Beschreibung der verschiedenen Technologien zur Dichtentrennung (Schwimm-Sink-Becken, Hydrozyklon, Zentrifuge) kann in UBA-Texte 92/2021 nachgelesen werden (Knappe et al., 2021). Das Schwimmgut wird anschließend getrocknet (mechanisch/thermisch).

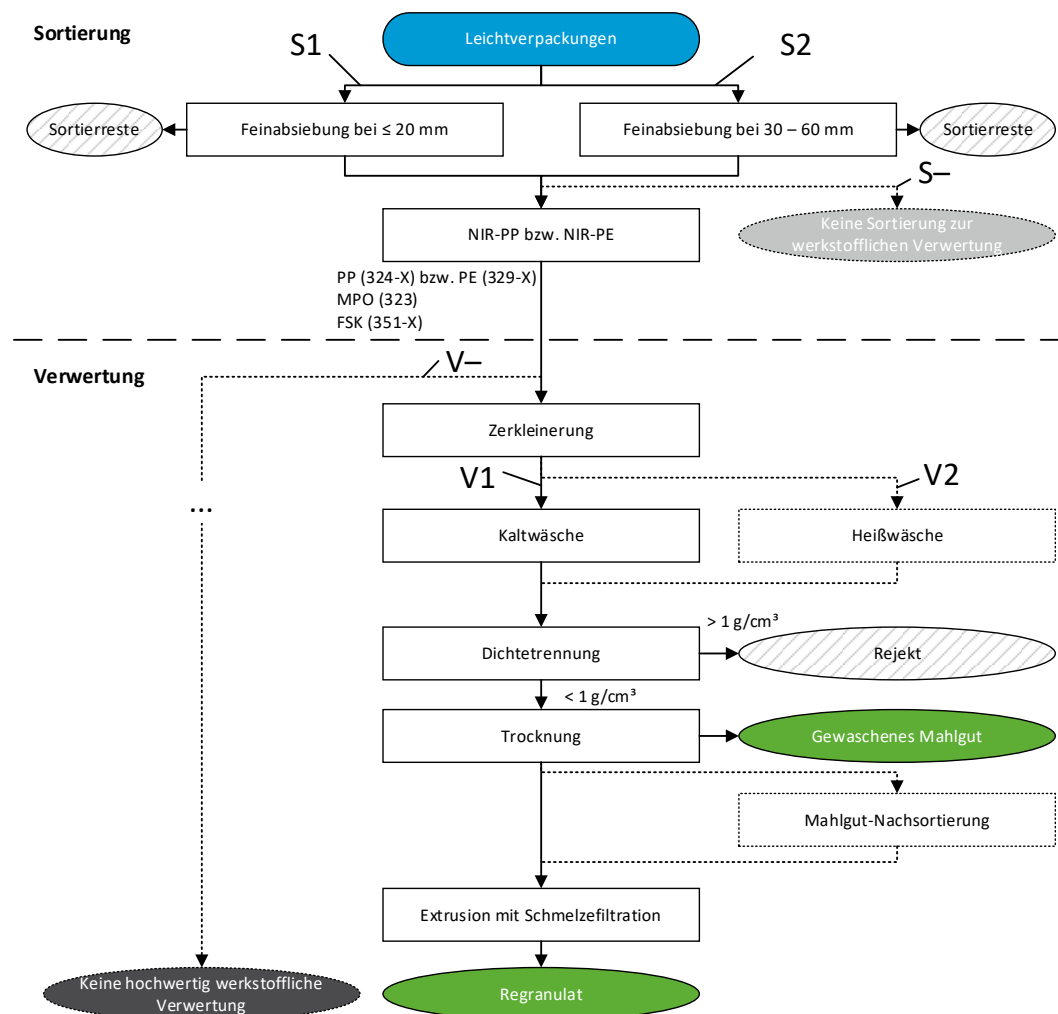
Wenige Anlagen gaben an, eine Mahlgut-Nachsortierung durchzuführen. Diese kann stofflich oder farblich erfolgen. Die ursprüngliche Farbe des Mahlgutes lässt sich nicht entfernen, sodass eine Farbänderung nur durch eine Überfärbung möglich ist. Eine Mahlgut-Farbsortierung ermöglicht eine Sortierung des Mahlguts nach Farben, sodass helles Mahlgut separiert wird und in dafür passenden Anwendungen eingesetzt werden kann (Knappe et al., 2021). Anlagen mit Mahlgut-Nachsortierung wurden nicht als weitere Verwertungsvariante eingestuft, weil dies für die Zwecke des Mindeststandards nicht von Belang ist. Möglicherweise kann dieses Verfahren als Verwertungsvariante in zukünftigen Auswertungen mit angegeben werden, sofern es für Zwecke des Mindeststandards eine Relevanz erlangt.

Mittels Extrusion mit Schmelzefiltration wird das Mahlgut zu Regranulaten umgeschmolzen und als Verkaufseinheit bereitgestellt. Im Umschmelzprozess sind insbesondere die Bestandteile (z. B. Additive oder Blends) im Regranulat problematisch, die sich im Schmelzprozess zersetzen und eine geringere Schmelztemperatur gegenüber der Verarbeitungstemperatur (HDPE: ca. 160 °C – 220 °C und PP: ca. 200 °C – 270 °C) besitzen. (Tschachtli et al., 2019). Diese Bestandteile können die Eigenschaften des finalen Rezyklats verändern. Höher schmelzende Bestandteile können als Rückstand über Schmelzefiltration separiert werden. Nachteilig ist dabei der Aufwand für die Reinigung des Filtersiebes sowie der Ausbeuteverlust (Tschachtli et al., 2019).

⁷ Nach Austausch mit einem Experten wurde als Kriterium für die Heißwäsche eine Temperatur von $\geq 70 \text{ °C}$ definiert (Gespräch mit Hr. Dr. Christiani am 27.03.2023).

Sowohl die Heißwäsche als auch die Mahlgutnachsorthierungen stellen bei PE- und PP-Verwertern den Stand der Technik dar. Zudem ist aus dem Austausch mit einem Experten bekannt, dass mit geringer Mengenrelevanz Vakuumextraktion als Verfahren im Einsatz ist (Gespräch mit Hr. Dr. Christiani am 27.03.2023). In den Fragebögen wurde diese Prozesstechnik (noch) nicht seitens der PE- und PP-Verwerter angegeben. Über Vakuumextraktion können schwer flüchtige, hochmolekulare Stoffe im Regranulat entfernt werden. Dies ermöglicht eine Reduktion von Gerüchen (Szombathy, 2021). Weitere Prozessschritte wurden von den befragten Anlagen nicht angegeben. In keiner der befragten Anlagen wurden lösemittelbasierte Verfahren im industriellen Maßstab angewendet.

Abbildung 12: Schematische Darstellung der Pfadbeschreibung für die Sortierung und Verwertung von formstabilen PP- und PE-Verpackungen



Legende und Erläuterung

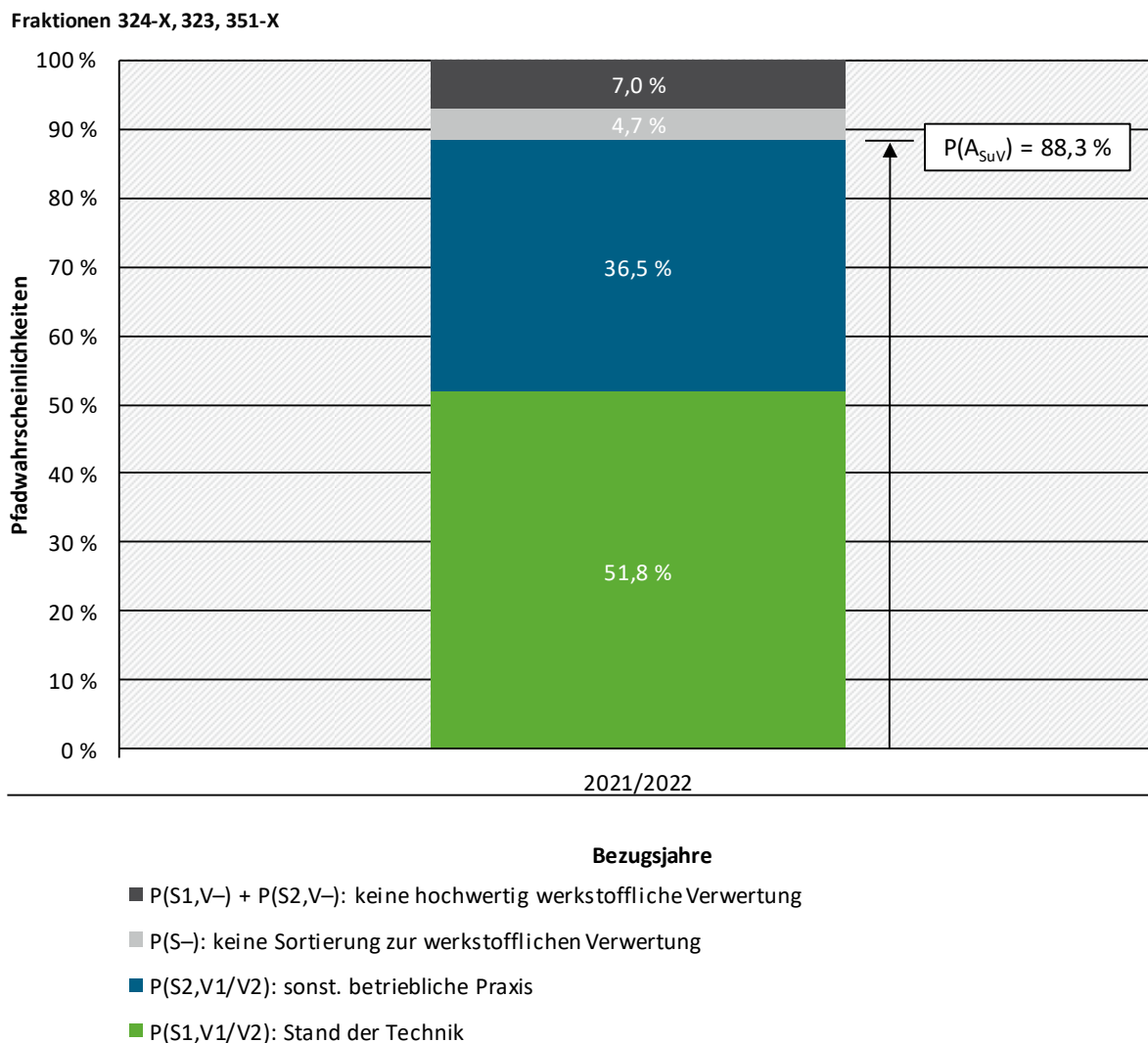
- Ausgangsmaterial
- Nebenprodukt (energetische Verwertung)
- Wahrscheinlichkeiten der Varianten werden nicht in die Anwendungsgrade einberechnet
- Hauptprodukt (hochwertige werkstoffliche Verwertung)
- Prozessstufe
- Geringe Mengenrelevanz der Zweigwahrscheinlichkeiten

Quelle: eigene aktualisierte Darstellung nach Grummt (2022), Umweltbundesamt, auf Grundlage von Dehoust et al. (2021)

3.3.3 Ermittlung der Praxis der SuV für PP und PE

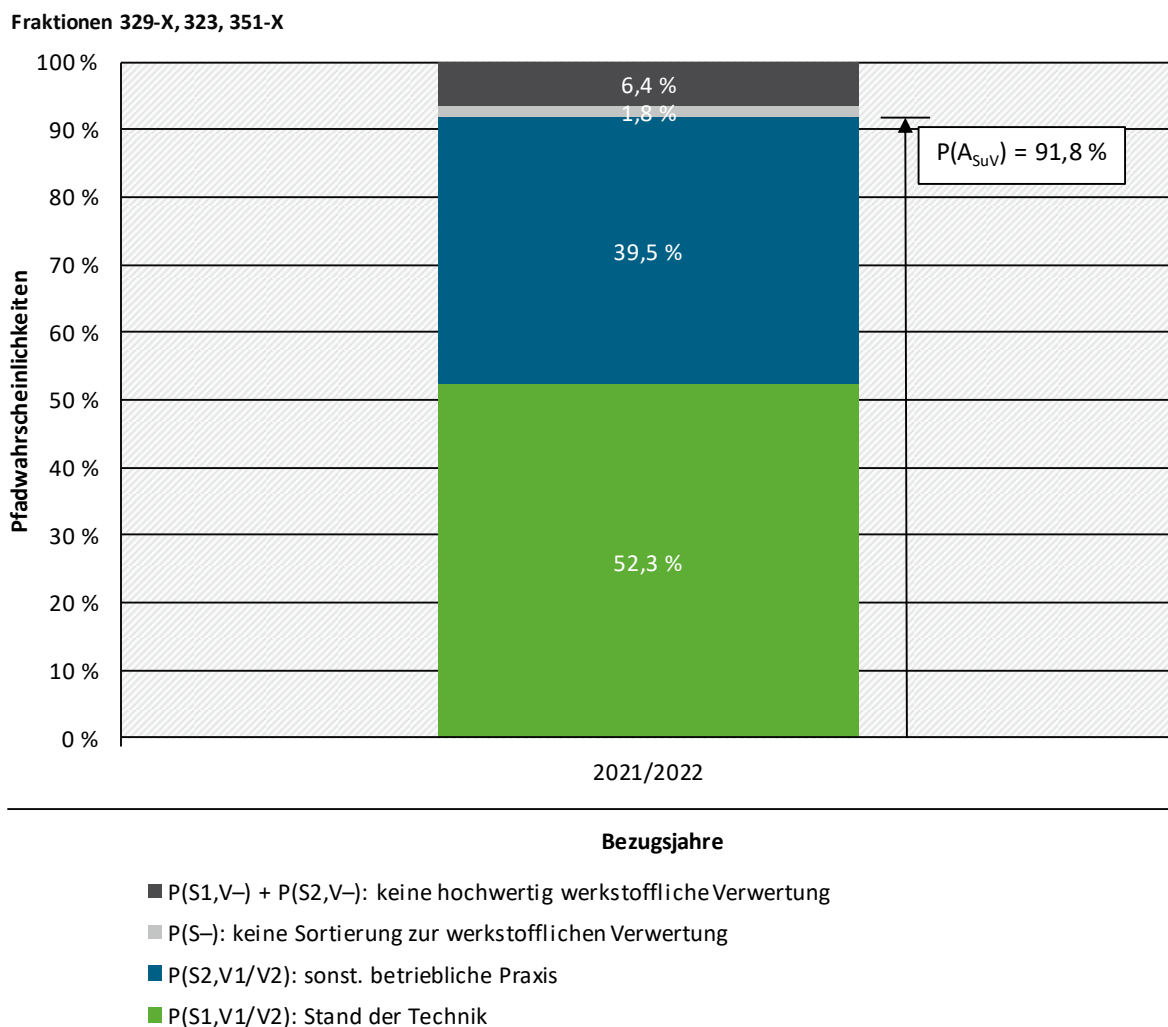
Aus den Verarbeitungsmengen der LVP-Sortierer für 2022, als auch aus den Verwertungszuführungsmengen aus dem MSN 2021, kann $P(A_{SuV})$ für PP und PE berechnet werden. $P(A_{SuV})$ beträgt für die Bezugsjahre 2021/2022 für PP 88,3 % und für PE in Summe 91,8 %. Die Verteilung der Mengen auf die in Abbildung 12 dargestellten Pfade ist in Abbildung 13 für PP und in Abbildung 14 für PE abgebildet.

Abbildung 13: Praxis der SuV für formstabile PP-Verpackungen (Bezugsjahre 2021/2022)



Quelle: eigene Darstellung, Umweltbundesamt, auf methodischer Grundlage von Dehoust et al. (2021)

Abbildung 14: Praxis der SuV für formstabile PE-Verpackungen (Bezugsjahre 2021/2022)



Quelle: eigene Darstellung, Umweltbundesamt, auf methodischer Grundlage von Dehoust et al. (2021)

Die Pfadwahrscheinlichkeit $P(S1,V1/V2)$ mit 51,8 % bei PP und mit 52,3 % bei PE wird als Stand der Technik eingestuft. Bei dieser Variante findet eine Feinkornabsiebung bei ≤ 20 mm sowie eine anschließende Zuführung zu einer hochwertigen werkstofflichen Verwertung statt. Die Wäsche des Mahlguts wird überwiegend als Kaltwäsche ausgeführt. Als sonstige betriebliche Praxis wurde $P(S2,V1/V2)$ mit 36,5 % bei PP und 39,5 % bei PE ermittelt. Diese Wahrscheinlichkeit umfasst eine Feinkornabsiebung bei 30 mm – 60 mm sowie eine Zuführung zu einer hochwertigen werkstofflichen Verwertung. Die Wahrscheinlichkeiten, dass keine hochwertige werkstoffliche Verwertung stattfindet (Varianten mit S- und V-) betragen insgesamt 11,7 % bei PP und 8,2 % bei PE.

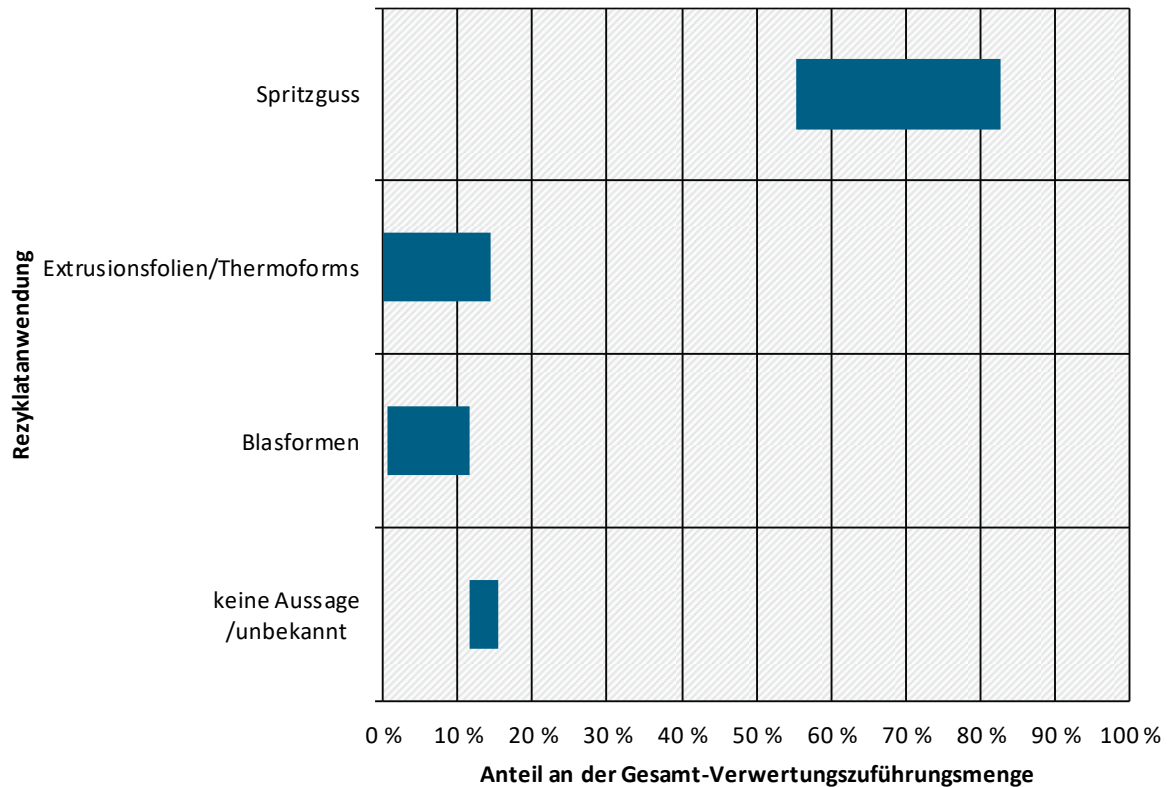
$P(A_{SuV})$ für Kunststoff-Hohlkörper aus PE oder PP beträgt 93,3 %. Dieser wurde separat bestimmt, da die Hohlkörper (Eimer und Kanister < 5 Liter) im Mindeststandard einzeln aufgeführt sind.

3.3.4 Rezyklatwendungen

Von den PP-Verwertern wurden überwiegend Spritzgussanwendungen als Rezyklatanwendung genannt (Abbildung 15). Von den PE-Verwertern mit Referenzanlagen wurden überwiegend

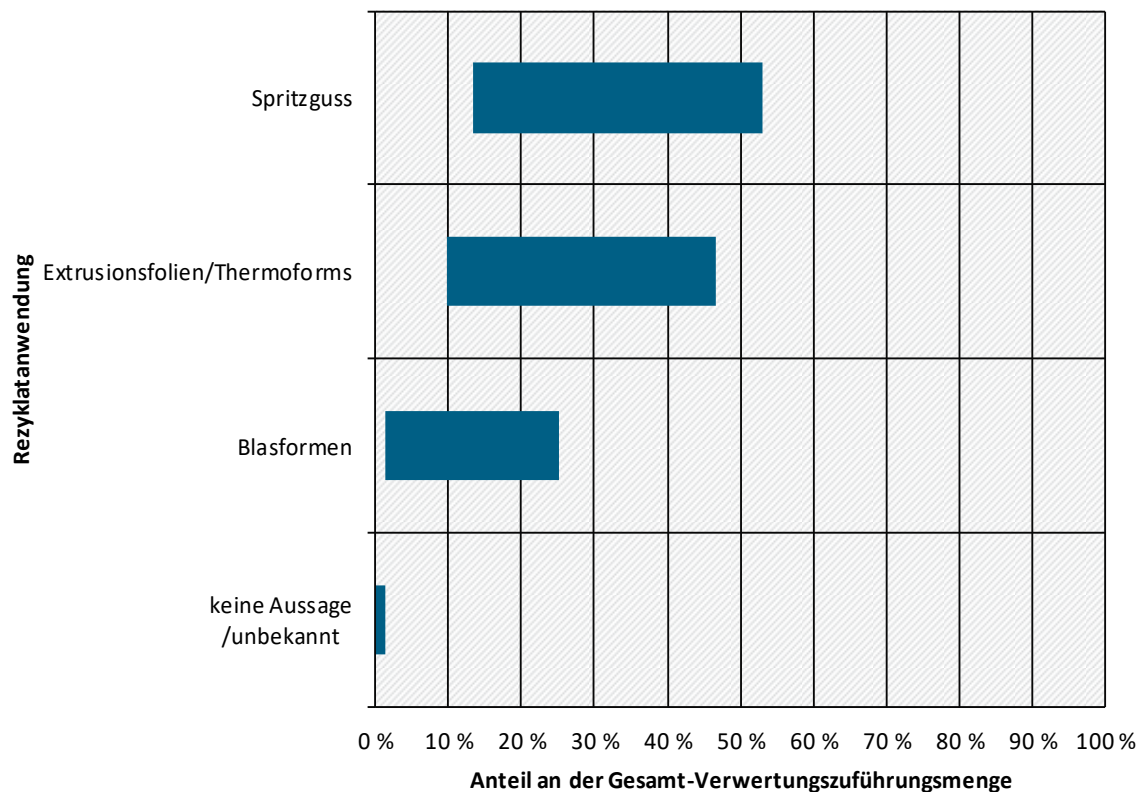
Spritzgussanwendungen, Extrusionsfolien/Thermoforms, aber auch Blasformprodukte als Rezyklatanwendungen angegeben (Abbildung 16). Es ist geplant, die Verteilung der Mengen je Rezyklatanwendung bei der nächsten Erhebung mit abzufragen. Produktbeispiele für Spritzgussanwendungen sind Farb- und Mülleimer (Christiani, 2021), Transportkisten oder Wannen.

Abbildung 15: Rezyklatanwendungen der Referenzanlagen (Bezugsjahr 2021) für die Verwertung von PP-Verpackungen



Quelle: eigene Darstellung, Umweltbundesamt

Abbildung 16: Rezyklatanwendungen der Referenzanlagen (Bezugsjahr 2021) für die Verwertung von PE-Verpackungen



Quelle: eigene Darstellung, Umweltbundesamt

3.3.5 Einstufung problematischer Verpackungsmerkmale bei der Verwertung

Die Erhebung bot den PP- und PE-Verwertern die Möglichkeit, eine Einschätzung zur Relevanz problematischer Verpackungsmerkmale zu geben, welche spezifische Probleme im Verwertungsprozess verursachen können. Die dazugehörigen Ergebnisse sind in Tabelle 4 (PP-Verwerter) und Tabelle 5 (PE-Verwerter) dargestellt. Als Basis dafür dienen die im Anhang 3 des Mindeststandards 2021 aufgeführten Recyclingunverträglichkeiten (ZSVR, 2021, S. 29). Zusätzlich abgefragt wurde der Punkt „nicht magnetische Metalle“. Des Weiteren konnten zusätzliche Angaben (gelistet unter „Weitere Angaben“) zu problematischen Verpackungsmerkmalen gemacht werden. Diese konnten ebenso von den Verwertern hinsichtlich ihrer Relevanz eingeschätzt werden.

Tabelle 4: Einschätzung der PP-Verwerter zu problematischen Verpackungsmerkmalen (Gesamtanzahl an Referenzanlagen: 28)⁸

Problematische Verpackungsmerkmale	Problem unbekannt	kein Problem	Problem nicht gelöst, aber aufgrund geringer Mengenrelevanz bedeutungslos	Problem bekannt, technisch		keine Angabe
				weitgehend gelöst	nicht gelöst	
Silikonkomponenten	0	3	6	3	13	3
Komponenten geschäumter nicht thermoplastischer Elastomere	0	3	3	6	11	5
Geklebte zellulosehaltige Etiketten, die sich unter den Bedingungen einer Kaltwäsche nicht ablösen lassen	0	4	4	5	15	0
PA-Schichten	1	2	3	3	18	1
PVDC-Schichten	3	1	3	4	13	4
Nicht-PO-Kunststoffe der Dichte < 1 g/cm ³	1	5	2	6	8	6
PET-Sleeves Dichte < 1 g/cm ³	2	6	3	7	6	6
Nicht magnetische Metalle	0	5	3	12	2	6
Weitere Angaben:						
Papier-Kunststoff-Verbunde					3	
Elastomer und Silikon					3	
Biobasierte Kunststoffe			1			
Verpackungen mit anderer Dichte, sodass die Schwimm-Sink-Trennung nicht funktioniert					1	
Kork, Textilien als Fehlwürfe				1		

Quelle: Tabelle basierend auf Grummt (2022) und der aktuellen Erhebung, auf methodischer Grundlage von Dehoust et al. (2021)

⁸ Bei Mehrfachantworten einer Anlage wurde nur die Antwort mit der kritischeren Bewertung berücksichtigt.

Tabelle 5: Einschätzung der PE-Verwerter zu problematischen Verpackungsmerkmalen bei der Verwertung (Gesamtanzahl an Referenzanlagen: 31)⁹

Problematische Verpackungsmerkmale	Problem unbekannt	kein Problem	Problem nicht gelöst, aber aufgrund geringer Mengenrelevanz bedeutungslos	Problem bekannt, technisch		keine Angabe
				weitgehend gelöst	Nicht gelöst	
Silikonkomponenten	1	2	7	3	14	4
Komponenten geschäumter nicht thermoplastischer Elastomere	1	2	3	8	9	8
Geklebte zellulosehaltige Etiketten, die sich unter den Bedingungen einer Kaltwäsche nicht ablösen lassen	1	4	6	5	15	0
PA-Schichten	2	1	4	3	18	3
PE-X-Komponenten	4	1	3	3	8	12
PVDC-Schichten	4	0	4	4	13	6
Nicht-PO-Kunststoffe der Dichte < 1 g/cm ³	2	5	4	7	6	7
PET-Sleeves Dichte < 1 g/cm ³	2	5	5	8	4	7
Nicht magnetische Metalle	1	6	3	13	2	6

Weitere Angaben:

Papier-Kunststoff-Verbunde					4	
Elastomer und Silikon					4	
Verpackungen mit anderer Dichte, sodass die Schwimm-Sink-Trennung nicht funktioniert					1	
Biobasierte Kunststoffe			1			

Quelle: Tabelle basierend auf Grummt (2022) und der aktuellen Erhebung, auf methodischer Grundlage von Dehoust et al. (2021)

⁹ Bei Mehrfachantworten einer Anlage wurde nur die Antwort mit der kritischeren Bewertung berücksichtigt.

Es ist festzustellen, dass die Angaben im Anhang 3 überwiegend von den Verwertern bestätigt werden. Insbesondere PVDC- und PA-Schichten, Silikonkomponenten sowie zellulosehaltige Etiketten wurden von etwa der Hälfte der PE- und PP-Anlagenbetreiber als nicht gelöstes Problem betrachtet. Wir empfehlen, alle im Anhang 3 des Mindeststandards aufgelisteten Punkte weiterhin beizubehalten. „Nicht magnetische Metalle“ wurden nur von 2 der befragten 28 PP- bzw. 31 PE-Referenzanlagen als nicht gelöst angesehen. Eine Aufnahme dieses Punktes wird vorerst nicht empfohlen. Im Folgenden werden drei der angegebenen problematischen Verpackungsmerkmale diskutiert, welche als nicht gelöst eingestuft wurden:

- ▶ „Elastomer und Silikon“ wurde von zwei Verwertern als „nicht gelöst“ eingestuft. Silikone sind Elastomere und bereits sowohl als „Kartuschen für Dichtmassen“ im Anhang 1 als Verpackung außerhalb der Spezifikation sowie als „Silikonkomponenten“ im Anhang 3 des Mindeststandards aufgeführt (ZSVR, 2022). Gummi und Silikone sind potentielle Geruchsverursacher, da sie bei der Extrusion verbrennen und zu erheblichen Qualitätsproblemen führen können (Kitzberger, 2017). Die zwei Verwerter gaben an, dass auch andere Elastomere den Recyclingprozess erschweren können. Als Beispiel wurde seitens des Aufbereiters Flipflops aus Gummi und Silikonbackformen und -matten genannt. Die genannten Beispiele stellen einen Fehlwurf dar. Da Fehlwürfe nicht im Mindeststandard aufgeführt werden, besteht vorerst kein Handlungsbedarf für den Mindeststandard.
- ▶ Verpackungen, bei denen die Verpackungsdichte durch Additive verändert wurde, sodass sie bei der Dichtentrennung dem falschen Wertstoffstrom zugeordnet werden, sind bereits im Mindeststandard 2022 unter 4.2 aufgeführt und als nicht recyclingfähig zu bewerten (ZSVR, 2022). Es besteht demnach kein Handlungsbedarf für den Mindeststandard.
- ▶ 3 der 28 PP-Verwerter stuften „Papier-Kunststoff-Verbunde“ als nicht gelöstes Problem ein. Lässt sich das Papier nicht vom Kunststoff trennen, können verbleibende Papierfasern Qualitätsprobleme im Recyclingprozess verursachen. Ursache dafür ist, dass die Papierfasern Feuchtigkeit und organische Stoffe (z. B. Fette) aufnehmen können. Die Feuchtigkeit verdampft im Verwertungsprozess und die organischen Stoffe verbrennen während der Extrusion. Durch die Verbrennung entstehen Gerüche. Diese können sich auf den Kunststoff übertragen. Rezyklate mit Geruchsproblemen erschweren den Einsatz in hochwertigen Anwendungen. Die Gerüche können durch Entgasungs- und Filtrationstechniken vermindert werden (Kitzberger, 2017; Knappe et al., 2021). Papierfaserhaltige Etiketten sind bereits im Anhang 3 über das Kriterium „Geklebte zellulosehaltige Etiketten, die sich unter den Bedingungen einer Kaltwäsche nicht ablösen lassen“ abgedeckt (ZSVR, 2022). Der vorgesehene Sortier- und Verwertungspfad für faserbasierte Verbundpackungen in LVP-Sortieranlagen ist die Zuführung zur Fraktion PPK aus LVP. Sollten faserbasierte Verbundverpackungen bei Kunststoff-Verwertern landen, ist dies als ein Problem der Identifizierbarkeit in der sensorgestützten Sortierung einzustufen (Anhang 2). „Lackierte Oberfläche (außer klare Schutzlacke bis zu einer Lackstärke von ≤ 5 Mikrometer)“ sowie „kunststoffbeschichtete Oberfläche“ sind bereits im Anhang 2 aufgelistet (ZSVR, 2022). Es besteht demnach vorerst kein Handlungsbedarf für den Mindeststandard.

3.4 Verwertung von MPO, PO-flex und PP-flex

3.4.1 Rücklauf der Erhebung

An insgesamt 39 Verwerter von MPO, PO-flex und PP-flex wurden Erhebungsbögen in zwei Erhebungen versendet. In wenigen Sortieranlagen erfolgt die Sortierung von flexiblen PP-

Verpackungen und PP-Folien als Monofraktion (324-2, teilweise auch als 324-1). Mit 28 ausgefüllten Erhebungsbögen wurde eine Rücklaufquote von 72 % erreicht. Für Verwerter von MPO, PO-flex und PP-flex mit Standort in Deutschland wurde eine Rücklaufquote von 88 % erzielt. Die Gesamtzuführungsmenge der Verwertungsanlagen, die einen Erhebungsbogen zurücksendeten, liegt laut MSN 2021 für MPO, PO-flex und PP-flex in 2020 bei ca. 126.000 t (gerundet auf 1.000 t/a). Damit wurden 92 % der Gesamtzuführungsmenge aller Verwerter von MPO, PO-flex und PP-flex aus dem MSN 2021 abgedeckt. Dieser abgedeckte Mengenanteil liegt über 70 % der Gesamtzuführungsmenge und wird damit als repräsentativ angesehen.

Berücksichtigt wurden ausschließlich Letztempfängeranlagen und die Fraktionen 323-2 (PO-flex), 323 (MPO) und 323-2 (PP-flex). Der Rücklauf des Erhebungsbogens „Kunststofffolien-Verwertung“ (Fraktionen 310/310-1) wurde unter Abschnitt 3.2 betrachtet.

Die Angaben der einzelnen Anlagen werden zum Schutz von Betriebs- und Geschäftsgeheimnissen und aus wettbewerbsrechtlichen Gründen vertraulich behandelt und nicht veröffentlicht.

Erhebungsbogen Verwerter von MPO, PO- und PP-Flex

- ▶ Rücklaufquote: im In- und Ausland: 72 % (28/39); im Inland: 88 % (21/24)
- ▶ Gesamtzuführungsmenge der Verwerter, die Erhebungsbögen zurücksendeten, aus MSN 2021: ca. 126.000 t; entspricht 92 % der Gesamtmenge aller MPO-, PO- und PP-flex-Verwerter i. H. v. ca. 137.000 (Datenübermittlung ZSVR an UBA am 24.11.2022; Mengen gerundet auf 1.000 t/a)

3.4.2 Pfadbeschreibung

Abbildung 17 zeigt die Pfadbeschreibung für die Sortierung und Verwertung von flexiblen kleinformigen Verpackungen. Als Grundlage der Erläuterung und der Reihenfolge der Prozesse dienen die beiden Erhebungen zur Ermittlung der Praxis der SuV, die Publikation UBA-TEXTE 11/2021 (Dehoust et al., 2021) sowie der Anforderungs- und Bewertungskatalog von cyclo-HTP in der Version 5.1 (Institut cyclo-HTP GmbH, 2022). In wenigen Anlagen werden aus Gründen der Produktqualität gewerbliche Abfälle, Produktionsabfälle oder auch Systemmengen ausländischer Herkunft mitverarbeitet.

S1 (≤ 20 mm) und S2 (30 mm – 60 mm) kennzeichnen die zwei verschiedenen Sortierprozessvarianten und unterscheiden sich in der Maschenweite bei der Feinkornabsiebung in der LVP-Sortieranlage. S– umfasst die Anlagen, die keine der genannten Fraktionen aussortieren und für ein Recycling bereitstellen. Die Verpackungen werden in den LVP-Sortieranlagen über NIR-Trenner abgetrennt und für die Verwertungsanlagen als Großballen bereitgestellt. Die Verwertungsprozessvarianten V1 und V2 beschreiben die Referenzanlagen. V– umfasst alle Verwertungsanlagen, die keine Referenzanlagen darstellen.

Nach der Abtrennung des Bindendrahtes werden die Verpackungen zu Mahlgut zerkleinert. In der trockenmechanischen Aufbereitung über Windsichtung und Metallabscheider werden lose Verunreinigungen abgetrennt (z. B. Papier, FE-, NE-Metalle).

Anschließend folgt der Waschprozess mit dem Ziel Klebstoffreste, Anhaftungen und Etiketten zu entfernen. Die Wäsche wird bei den befragten Verwertungsanlagen als Kaltwäsche ausgeführt (V1).

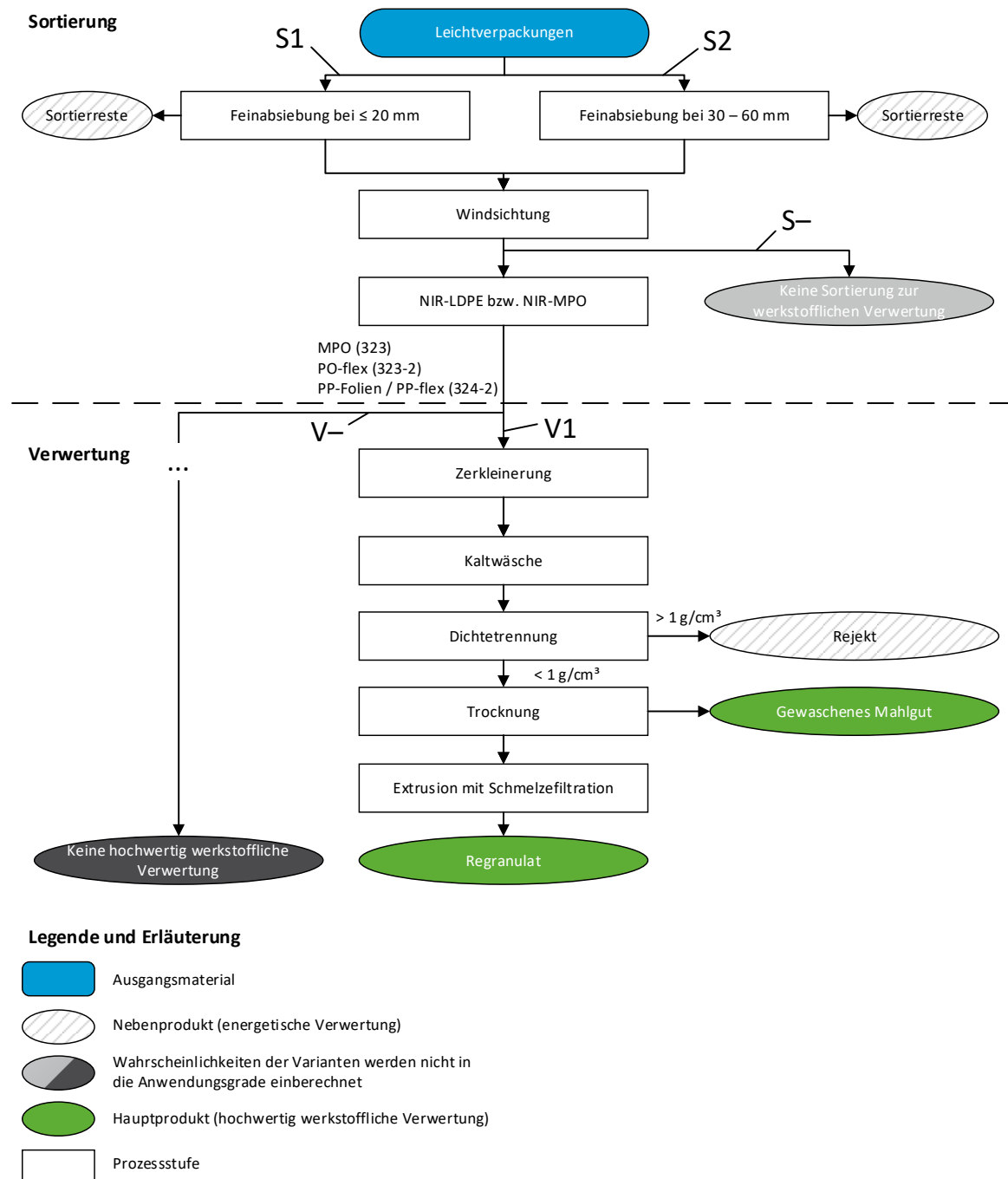
Die Dichtentrennung wird als Schwimm-Sink-Trennung über Verfahren wie Schwimm-Sink-Becken bei einer Dichte von 1 g/cm^3 durchgeführt. Das Sinkgut wird als Rejekt abgetrennt. Dazu gehören beispielsweise Verpackungskomponenten aus PS, PET oder PVC (Tschachtli et al.,

2019). Eine detaillierte Beschreibung der verschiedenen Technologien zur Dichtentrennung (Schwimm-Sink-Becken, Hydrozyklon, Zentrifuge) kann in UBA-Texte 92/2021 nachgelesen werden (Knappe et al., 2021). Das Schwimmgut wird anschließend getrocknet (mechanisch/thermisch).

Mittels Extrusion mit Schmelzefiltration wird das Mahlgut zu Regranulaten umgeschmolzen und als Verkaufseinheit bereitgestellt. Im Umschmelzprozess sind insbesondere die Bestandteile (z. B. Additive oder Blends) im Regranulat problematisch, die sich im Schmelzprozess zersetzen und eine geringere Schmelztemperatur gegenüber der Verarbeitungstemperatur (> 200 °C) besitzen (Tschachtli et al., 2019). Diese Bestandteile können die Eigenschaften des finalen Rezyklats verändern. Höher schmelzende Bestandteile können als Rückstand über Schmelzefiltration separiert werden. Nachteilig ist dabei der Aufwand für die Reinigung des Filtersiebes sowie der Ausbeuteverlust (Tschachtli et al., 2019).

Weitere Prozessschritte wurden von den befragten Anlagen nicht angegeben. In keiner der befragten Anlagen werden lösemittelbasierte Verfahren oder Mahlgut-Farbsortierung im industriellen Maßstab angewendet.

Abbildung 17: Schematische Darstellung der Pfadbeschreibung für die Sortierung und Verwertung von flexiblen PO-Verpackungen

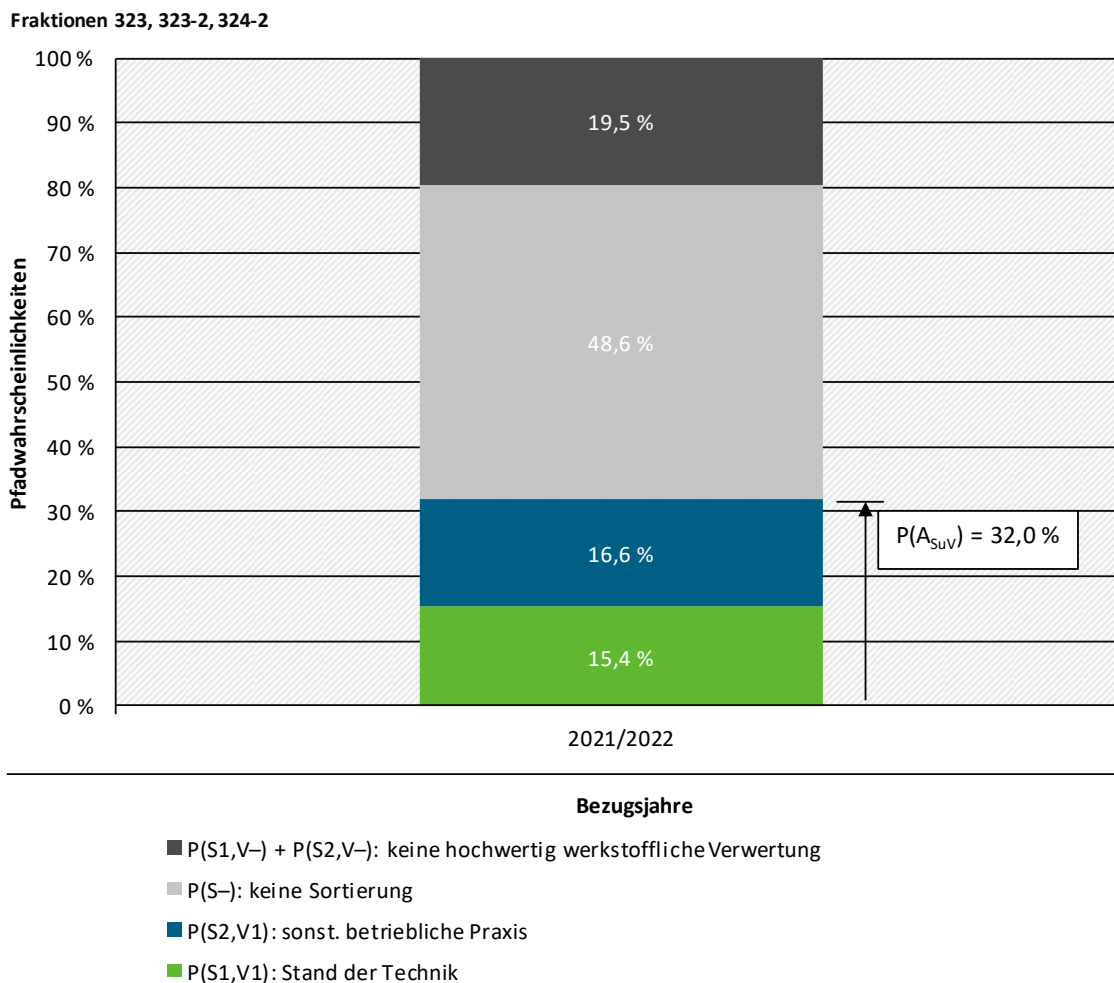


Quelle: eigene aktualisierte Darstellung nach Grummt (2022), Umweltbundesamt, auf Grundlage von Dehoust et al. (2021)

3.4.3 Ermittlung der Praxis der SuV für MPO und PO-flex

Aus den Verarbeitungsmengen der LVP-Sortierer für 2022, als auch aus den Verwertungszuführungsmengen aus dem MSN 2021, kann $P(A_{\text{SuV}})$ für MPO, PO-/PP-flex berechnet werden. $P(A_{\text{SuV}})$ beträgt für die Bezugsjahre 2021/2022 in Summe 32,0 % (ohne Einbezug der Folien-Fractionen 310/310-1). Die Verteilung der Mengen auf die in Abbildung 17 dargestellten Pfade ist in Abbildung 18 abgebildet.

Abbildung 18: Praxis der SuV für flexible PP-Verpackungen (Bezugsjahre 2021/2022)¹⁰



Quelle: eigene Darstellung, Umweltbundesamt, auf methodischer Grundlage von Dehoust et al. (2021)

Die Pfadwahrscheinlichkeit P(S1,V1) wird mit 15,4 % als Stand der Technik eingestuft. Bei dieser Variante findet eine Feinkornabsiebung bei ≤ 20 mm sowie eine anschließende Zuführung zu einer hochwertigen werkstofflichen Verwertung statt. Die Wäsche des Mahlguts wird dabei i. d. R. als Kaltwäsche ausgeführt. Als sonstige betriebliche Praxis wurde P(S2,V1) mit 16,6 % ermittelt. Diese Wahrscheinlichkeit umfasst eine Feinkornabsiebung bei 30 mm – 60 mm sowie eine hochwertige werkstoffliche Verwertung. Die Wahrscheinlichkeiten, dass keine hochwertige werkstoffliche Verwertung stattfindet (Varianten mit S- und V-) betragen insgesamt 68,1 %.

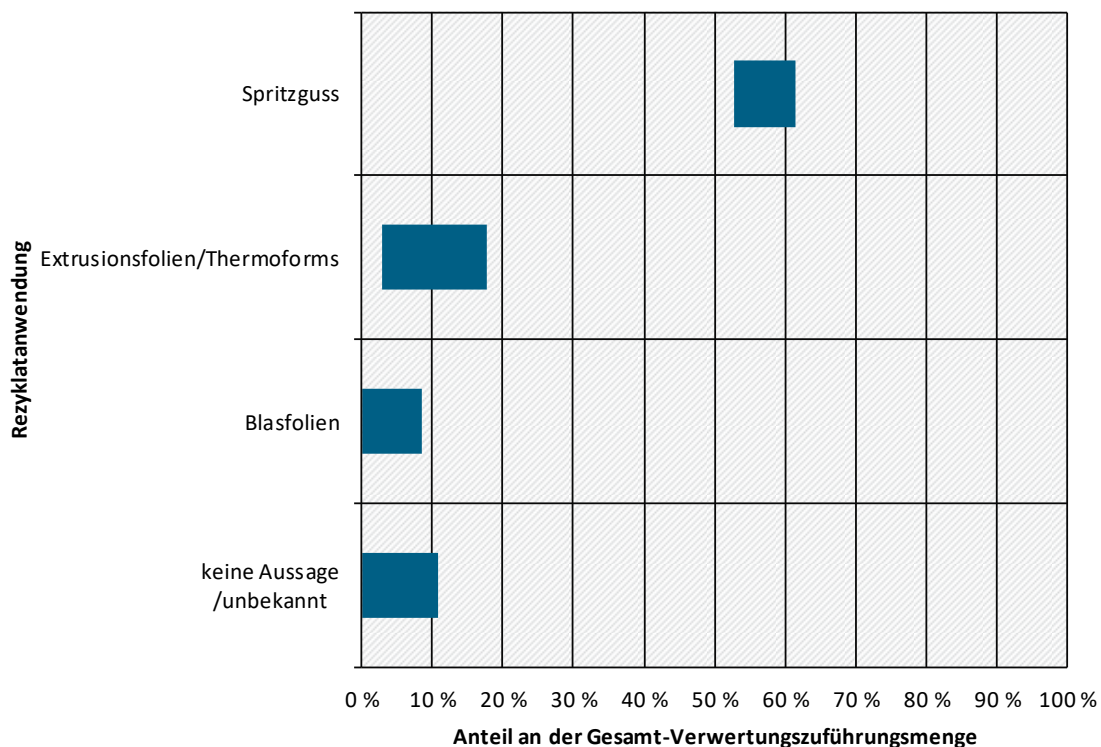
Bei der Berechnung von $P(A_{SuV})$ für kleinformatige PE-Folien, müssen zusätzlich zu den Fraktionen MPO (323) und PO-flex (323-2) die Folienfraktionen (310/310-1) mit einbezogen werden. Die Fraktion PP-flex (324-2) ist hingegen nur für PP-Folien und flexible PP-Verpackungen von Bedeutung. Der errechnete $P(A_{SuV})$ für kleinformatige PE-Folien beträgt 51,4 %. Bei der Sortierung wurden dabei nur die Sortieranlagen einbezogen, die angeben, auch kleinformatige Folien in die Fraktion 310/310-1 zu sortieren und für ein Recycling bereitzustellen. $P(A_S)$ für kleinformatige PE-Folien beträgt 70,5 % und $P(A_V)$ ist 72,9 % (Fraktionen 310/310-1, 323, 323-2), weshalb sich in Folge der Multiplikation ein $P(A_{SuV})$ von 51,4 % ergibt.

¹⁰ Die Folienfraktionen 310 und 310-1 wurden hierbei nicht mit einbezogen.

3.4.4 Rezyklatanwendungen

Abbildung 19 zeigt die von den Verwertern von flexiblen und formstabilen PO-Verpackungen angegebenen Rezyklatanwendungen. Bei den Verwertern mit Referenzanlagen wurden überwiegend Spritzgussanwendungen angegeben. Einige Referenzanlagen nannten auch Extrusionsfolien/Thermoforms sowie Blasfolienanwendungen. Es ist geplant, die Verteilung der Mengen je Rezyklatanwendung bei der nächsten Erhebung mit abzufragen. Produktbeispiele für Spritzgussanwendungen sind Eimer oder Wannen (Christiani, 2021).

Abbildung 19: Rezyklatanwendungen der Referenzanlagen (Bezugsjahr 2021) für die Verwertung von formstabilen und flexiblen PO-Verpackungen¹¹



Quelle: eigene Darstellung, Umweltbundesamt

3.4.5 Einstufung problematischer Verpackungsmerkmale bei der Verwertung

Die Erhebung bot den Verwertern von MPO und PO-/PP-flex die Möglichkeit, eine Einschätzung zur Relevanz problematischer Verpackungsmerkmale zu geben, welche spezifische Probleme im Verwertungsprozess verursachen können. Die dazugehörigen Ergebnisse sind in Tabelle 6 dargestellt. Als Basis dafür dienten die im Anhang 3 des Mindeststandards 2021 aufgeführten Recyclingunverträglichkeiten (ZSVR, 2021, S. 29). Zusätzlich abgefragt wurde der Punkt „PA-Schichten“. Des Weiteren konnten zusätzliche Angaben (gelistet unter „Weitere Angaben“) zu problematischen Verpackungsmerkmalen gemacht werden. Diese konnten ebenso von den Verwertern hinsichtlich ihrer Relevanz eingeschätzt werden.

¹¹ Aus wettbewerbsrechtlichen Gründen wurde die Spannweite geringfügig manipuliert. Die Folienfraktionen 310 und 310-1 wurden hier nicht mit einbezogen.

Tabelle 6: Einschätzung der MPO und PO-/PP-flex-Verwerter zu problematischen Verpackungsmerkmalen (Gesamtanzahl an Referenzanlagen: 16)¹²

Problematische Verpackungsmerkmale	Problem unbekannt	kein Problem	Problem nicht gelöst, aber aufgrund geringer Mengenrelevanz bedeutungslos	Problem bekannt, technisch		keine Angabe
				weitgehend gelöst	nicht gelöst	
Silikonkomponenten	0	3	4	1	3	5
Geschäumte nicht thermoplastische Elastomere mit der Dichte < 1 g/cm ³	0	2	1	4	2	7
Geschäumte nicht polyolefinische Komponenten	0	2	1	2	2	9
PA-Schichten	1	0	2	2	10	1
Geklebte zellulosehaltige Etiketten, die sich unter den Bedingungen einer Kaltwäsche nicht ablösen lassen	0	4	4	5	2	1

Weitere Angaben:

<i>Kork, Textilien</i>				1		
<i>Verhinderung der Restentleerung von Flaschen aufgrund des Designs</i>					1	
<i>Biobasierte oder biologisch abbaubare Kunststoffe</i>					2	
<i>PVC-Klebeband</i>					1	
<i>PVC</i>					1	
<i>Druckfarben (können die finale Rezyklatqualität herabsetzen)</i>				1		

Quelle: Tabelle basierend auf Grummt (2022) und der aktuellen Erhebung, auf methodischer Grundlage von Dehoust et al. (2021)

Es ist festzustellen, dass die Angaben im Anhang 3 überwiegend von den Verwertern bestätigt werden. Wir empfehlen, alle im Anhang 3 des Mindeststandards aufgelisteten Punkte weiterhin beizubehalten. Im Folgenden werden zwei der angegebenen problematischen Verpackungsmerkmale diskutiert, welche als nicht gelöst eingestuft wurden:

- Auf die Auswirkung möglicher Druckfarben wurde bereits im Abschnitt 3.2.5 eingegangen, weshalb an dieser Stelle auf diesen Abschnitt verwiesen wird. Wir empfehlen, die Aufnahme

¹² Bei Mehrfachantworten wurde nur die Antwort mit der kritischeren Bewertung der Problematik berücksichtigt.

von Druckfarb-Bestandteilen, welche das Recycling negativ beeinflussen können, im EK III zu prüfen.

- ▶ Kork und Textilien in den Kunststoffballen wurden von einem Verwerter als weitestgehend gelöstes Problem eingestuft. Die Ursache dafür sind Fehlwürfe und/oder Fehlsortierungen in der LVP-Sortieranlage. Da dies in diesem Fall nicht durch die Verpackungsgestaltung beeinflussbar ist und damit nicht für den Mindeststandard relevant ist, besteht kein Handlungsbedarf für den Mindeststandard.
- ▶ Ein Anlagenaufbereiter stufte konstruktionsbedingte Füllgutreste („Verhinderung der Restentleerung von Flaschen aufgrund des Designs“) als nicht gelöst ein. Manche Füllgutrückstände können die Rezyklatqualität negativ beeinflussen (Gürlich et al., 2022). Im Mindeststandard 2022 wurde der Umgang mit konstruktionsbedingten Füllgutresten im Mindeststandard bereits konkretisiert und Beispiele aufgenommen (z. B. Silikone, Acrylate, Polyurethane) (ZSVR, 2022).
- ▶ Für Verpackungen aus PVC und biobasierten oder biologisch abbaubaren Kunststoffen ist keine Sortierfraktion vorgesehen. Es besteht kein Recyclingpfad, wenn solche Verpackungen über die gelbe Tonne/den gelben Sack entsorgt werden. Diese Verpackungen sind nach aktueller Praxis nicht recyclingfähig. Dies geht auch aus dem Mindeststandard hervor. Für den Mindeststandard besteht demnach derzeit kein Handlungsbedarf.

3.5 Verwertung von PS

3.5.1 Rücklauf der Erhebung

An insgesamt 14 Verwerter von PS wurden Erhebungsbögen in zwei Erhebungen versendet. Mit 10 ausgefüllten Erhebungsbögen wurde eine Rücklaufquote von 71 % erreicht. Für Verwerter von PS mit Standort in Deutschland wurde eine Rücklaufquote von 80 % erzielt. Die Gesamtzuführungsmenge der Verwertungsanlagen, die einen Erhebungsbogen zurücksendeten, liegt für PS laut MSN 2021 bei ca. 26.000 t (gerundet auf 1.000 t/a). Damit wurden 96 % der Gesamtzuführungsmenge aller PS-Verwerter aus dem MSN 2021 abgedeckt. Dieser abgedeckte Mengenanteil liegt über 70 % der Gesamtzuführungsmenge und wird damit als repräsentativ angesehen.

Berücksichtigt wurden ausschließlich Letztempfängeranlagen und die Fraktionen 331 (PS) und 351-X (formstabile Kunststoffe).

Die Angaben der einzelnen Anlagen werden zum Schutz von Betriebs- und Geschäftsgeheimnissen und aus wettbewerbsrechtlichen Gründen vertraulich behandelt und nicht veröffentlicht.

Erhebungsbogen PS-Verwerter

- ▶ Rücklaufquote: im In- und Ausland: 71 % (10/14); im Inland: 80 % (8/10)
- ▶ Gesamtzuführungsmenge der Verwerter, die Erhebungsbögen zurücksendeten, aus MSN 2021: ca. 26.000 t; entspricht 96 % der Gesamtmenge aller PS-Verwerter i. H. v. ca. 27.000 t (Datenübermittlung ZSVR an UBA am 24.11.2022; Mengen gerundet auf 1.000 t/a)

3.5.2 Pfadbeschreibung

Abbildung 20 zeigt die Pfadbeschreibung für die Sortierung und Verwertung von formstabilen und nicht geschäumten PS-Verpackungen. Als Grundlage der Erläuterung und der Reihenfolge

der Prozesse dienten die beiden Erhebungen zur Ermittlung der Praxis der SuV, die Publikation UBA-TEXTE 11/2021 (Dehoust et al., 2021) sowie der Anforderungs- und Bewertungskatalog von cyclos-HTP in der Version 5.1 (Institut cyclos-HTP GmbH, 2022).

S1 (≤ 20 mm) und S2 (30 mm – 60 mm) kennzeichnen die zwei verschiedenen Sortierprozessvarianten und unterscheiden sich in der Maschenweite bei der Feinkornabsiebung in der LVP-Sortieranlage. S– umfasst die Anlagen, die kein PS aussortieren und für ein Recycling bereitstellen. Die PS-Verpackungen werden für die genannten Fraktionen in den LVP-Sortieranlagen über NIR-Trenner abgetrennt und für die Verwertungsanlagen als Großballen bereitgestellt. Bei nahezu allen befragten Verwertungsanlagen handelt es sich um Referenzanlagen (V1), damit beträgt $P(V1) \approx 100$ %.

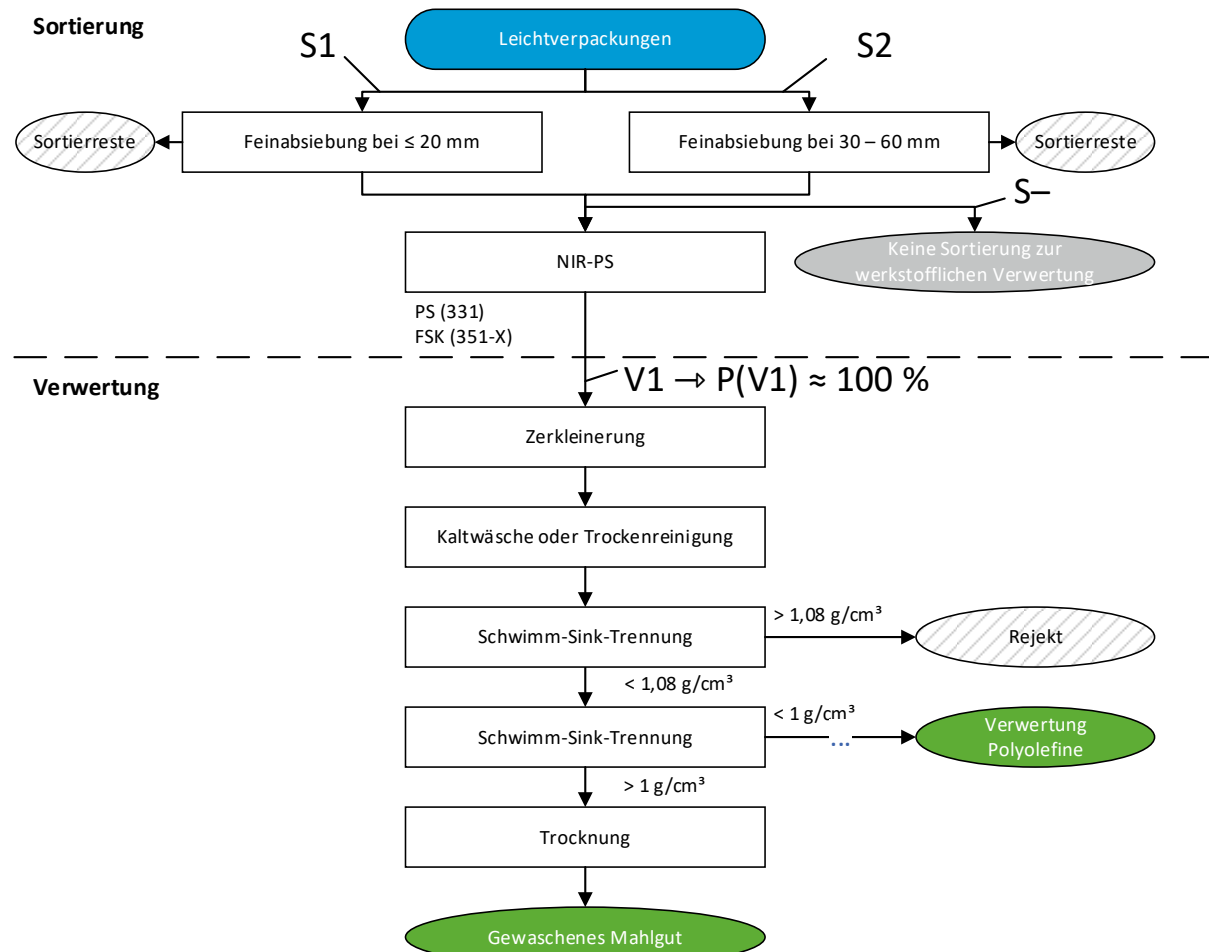
Nach der Abtrennung des Bindedrahtes werden die Verpackungen zu Mahlgut zerkleinert. In der trockenmechanischen Aufbereitung über Windsichtung und Metallabscheider werden lose Verunreinigungen abgetrennt (z. B. Papier, Fe-, NE-Metalle).

Anschließend folgt der Waschprozess mit dem Ziel, Klebstoffreste, Anhaftungen und Etiketten zu entfernen. Die Wäsche wird bei den befragten Verwertungsanlagen als Kaltwäsche ausgeführt. Die PS-Verwerter gaben an, dass die Wäsche ohne Zugabe von Natronlauge oder Detergenzien erfolgt.

Die Dichtentrennung erfolgt zweistufig als Schwimm-Sink-Trennung über Verfahren wie Schwimm-Sink-Becken bei den Dichten $1,08 \text{ g/cm}^3$ (sogenannte „Salzstufe“ (Dehoust, et al. 2021)) und 1 g/cm^3 . In den befragten Anlagen wird PS mit den Kunststoffen PE und PP zusammen verarbeitet. PS wird als Schwimmgut bei $1,08 \text{ g/cm}^3$ und als Sinkgut bei 1 g/cm^3 separiert. Bei der ersten Trennstufe wird das Sinkgut bei $1,08 \text{ g/cm}^3$ (z. B. PVC oder Metalle) als Rejekt ausgeschleust. Die zweite Trennstufe bei 1 g/cm^3 dient zur Trennung von PE / PP (Schwimmgut) und PS (Sinkgut). Eine detaillierte Beschreibung der verschiedenen Technologien zur Dichtentrennung (Schwimm-Sink-Becken, Hydrozyklon, Zentrifuge) kann in UBA-Texte 92/2021 nachgelesen werden (Knappe et al., 2021). Nach den beiden Trennstufen wird PS getrocknet (mechanisch/thermisch). Das Schwimmgut bei 1 g/cm^3 wird als PO-Rezyklat weiterverarbeitet.

Weitere Prozessschritte wurden von den befragten Anlagen nicht angegeben. In keiner der befragten Anlagen kommen lösemittelbasierte Verfahren, Heißwäsche oder Mahlgut-Farbsortierung im industriellen Maßstab zur Anwendung.

Abbildung 20: Schematische Darstellung der Pfadbeschreibung für die Sortierung und Verwertung von formstabilen PS-Verpackungen (ohne EPS)



Legende und Erläuterung

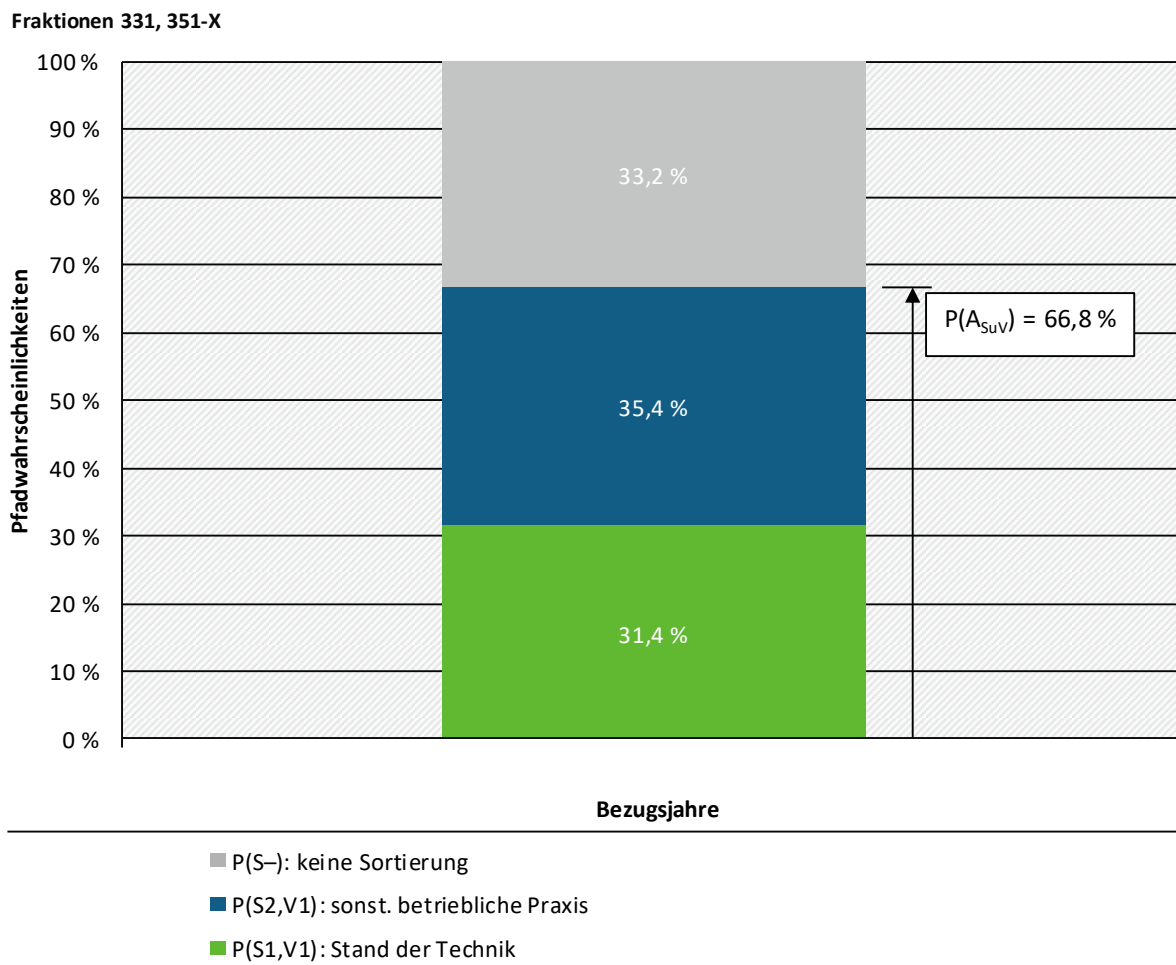
- Ausgangsmaterial
- Nebenprodukt (energetische Verwertung)
- Wahrscheinlichkeiten der Varianten werden nicht in die Anwendungsgrade einberechnet
- Hauptprodukt (hochwertige werkstoffliche Verwertung)
- Prozessstufe

Quelle: eigene aktualisierte Darstellung nach Grummt (2022), Umweltbundesamt, auf Grundlage von Dehoust et al. (2021)

3.5.3 Ermittlung der Praxis der SuV für PS

Aus den Verarbeitungsmengen der LVP-Sortierer für 2022, als auch aus den Verwertungszuführungsmengen aus dem MSN 2021, kann $P(A_{SuV})$ für PS-Verpackungen berechnet werden. $P(A_{SuV})$ beträgt für die Bezugsjahre 2021/2022 in Summe 66,8 %. Die Verteilung der Mengen auf die in Abbildung 20 dargestellten Pfade ist in Abbildung 21 abgebildet.

Abbildung 21: Praxis der SuV für formstabile PS-Verpackungen ohne EPS (Bezugsjahre 2021/2022)



Quelle: eigene Darstellung, Umweltbundesamt, auf methodischer Grundlage von Dehoust et al. (2021)

Die Pfadwahrscheinlichkeit $P(S1,V1)$ wird mit 31,4 % als Stand der Technik eingestuft. Bei dieser Variante erfolgt die Feinkornabsiebung in der LVP-Sortieranlage bei ≤ 20 mm und anschließend findet eine hochwertig werkstoffliche Verwertung statt. Die Wäsche des Mahlguts wird dabei als Kaltwäsche ausgeführt. Als sonstige betriebliche Praxis wurde $P(S2,V1)$ mit 35,4 % ermittelt. Diese Wahrscheinlichkeit umfasst eine Feinkornabsiebung bei 30 mm – 60 mm sowie eine hochwertige werkstoffliche Verwertung. $P(S-)$ beträgt 33,2 % und umfasst die Wahrscheinlichkeit, dass keine Sortierung stattfindet.

3.5.4 Rezyklatanwendungen

Bei den PS-Verwertern mit Referenzanlagen wurden, mengenmäßig betrachtet, fast ausschließlich Spritzgussprodukte als Rezyklat-Einsatzgebiet angegeben. Produktbeispiele für Spritzgussanwendungen stellen Wickelspulen, Ablageboxen für den Schreibtisch oder Kleiderbügel dar (Christiani, 2021).

3.5.5 Einstufung problematischer Verpackungsmerkmale bei der Verwertung

Die Erhebung bot den Verwertern von PS die Möglichkeit, eine Einschätzung zur Relevanz problematischer Verpackungsmerkmale zu geben, welche spezifische Probleme im Verwertungsprozess verursachen können. Die dazugehörigen Ergebnisse sind in Tabelle 7 dargestellt. Als Basis dafür dienten die im Anhang 3 des Mindeststandards 2021 aufgeführten

Recyclingunverträglichkeiten (ZSVR, 2021, S. 29). Zusätzlich abgefragt wurde der Punkt „nicht magnetische Metalle“. Des Weiteren konnten zusätzliche Angaben (gelistet unter „Weitere Angaben“) zu problematischen Verpackungsmerkmalen gemacht werden. Diese konnten ebenso von den Verwertern hinsichtlich ihrer Relevanz eingeschätzt werden.

Tabelle 7: Einschätzung der PS-Verwerter zu problematischen Verpackungsmerkmalen (Gesamtanzahl an Referenzanlagen: 10)

Problematische Verpackungsmerkmale	Problem unbekannt	kein Problem	Problem nicht gelöst, aber aufgrund geringer Mengenrelevanz bedeutungslos	Problem bekannt, technisch		keine Angabe
				weitgehend gelöst	nicht gelöst	
Fremdkunststoffe oder Multilayer der Dichteklasse 1,0 – 1,08 g/cm ³	0	0	0	1	3	6
Geklebte zellulosehaltige Etiketten, die sich unter Bedingungen einer Kaltwäsche nicht ablösen lassen	0	1	0	3	6	0
Nicht magnetische Metalle	0	3	0	7	0	0
Weitere Angaben:						
EPS			3			

Quelle: Tabelle basierend auf Grummt (2022) und der aktuellen Erhebung, auf methodischer Grundlage von Dehoust et al. (2021)

Es ist festzustellen, dass die Angaben im Anhang 3 überwiegend von den Verwertern bestätigt werden. Wir empfehlen, alle im Anhang 3 des Mindeststandards aufgelisteten Punkte weiterhin beizubehalten. „Nicht magnetische Metalle“ wurden von 3 von 10 PS-Verwertern als unproblematisch und von 7 der 10 PS-Verwertern als weitestgehend gelöstes Problem betrachtet. Eine Aufnahme dieses Punktes wird vorerst nicht empfohlen. EPS wurde seitens dreier Verwerter als nicht mengenrelevantes Problem eingestuft. EPS ist bereits als Verpackung außerhalb der Spezifikation im Anhang 1 bei den PS-Verpackungen aufgelistet. Es besteht demnach für den Mindeststandard kein Handlungsbedarf.

3.6 Verwertung von PET

3.6.1 Rücklauf der Erhebung

An insgesamt 38 PET-Verwerter wurden Erhebungsbögen in zwei Erhebungen versendet. Mit 17 ausgefüllten Erhebungsbögen wurde eine Rücklaufquote von 45 %¹³ erreicht. Für PET-Verwerter mit Standort in Deutschland wurde eine Rücklaufquote von 67 % erzielt. Die Gesamtzuführungsmenge der Verwertungsanlagen aus den MSN 2021, die einen Erhebungsbogen zurücksendeten, liegt für die Fraktionen 325 (PET-Flaschen) und 328-(0-3)

¹³ Inkl. Informationen aus dem Vollzug.

(Misch-PET) und PET-Schalen (328-5, 328-6) in 2021 bei ca. 32.000 t (gerundet auf 1.000 t/a). Damit wurden 71 % der Gesamtzuführungsmenge aller Verwerter der Fraktionen 325 und 328-(0-6) aus dem MSN 2021 abgedeckt. Dieser abgedeckte Mengenanteil liegt über 70 % der Gesamtzuführungsmenge und wird damit als repräsentativ angesehen. Berücksichtigt wurden ausschließlich Letztempfängeranlagen.

Die folgende Textbox „Erhebungsbogen PET-Verwerter“ zeigt die abgedeckten Mengenanteile aufgesplittet nach den Fraktionen PET-Flaschen und Misch-PET sowie PET-Schalen.

Anlagen, die ausschließlich bepfandete PET-Flaschen verwerten, wurden für die Erhebung nicht betrachtet. Der Grund dafür ist, dass diese PET-Flaschen über ein Pfandrücknahmesystem separat erfasst und einer Verwertung zugeführt werden.

Die Angaben der einzelnen Anlagen werden zum Schutz von Betriebs- und Geschäftsgeheimnissen und aus wettbewerbsrechtlichen Gründen vertraulich behandelt und nicht veröffentlicht.

Erhebungsbogen PET-Verwerter

- ▶ Rücklaufquote: im In- und Ausland: 45 %¹⁴ (17/38); im Inland: 67 % (14/21)
- ▶ Nur PET-Flaschen, transparent (Fraktion 325) und Misch-PET-(Fraktionen 328-(0-3)): Gesamtzuführungsmenge der Verwerter, die Erhebungsbögen zurücksendeten, aus MSN 2021: ca. 22.500 t; entspricht ca. 58 % der Gesamtmenge aller Verwerter der Fraktionen 325 und 328-(0-3) i. H. v. ca. 39.000 t (Datenübermittlung ZSVR an UBA am 24.11.2022; Mengen gerundet auf 100 t/a)
- ▶ Nur Fraktionen PET-Schalen (328-5, -6): Gesamtzuführungsmenge der Verwerter, die Erhebungsbögen zurücksendeten, aus MSN 2021: ca. 9.100 t; entspricht ca. 94 % der Gesamtmenge aller Verwerter der Fraktionen 328-5 und -6: i. H. v. 9.600 t (Datenübermittlung ZSVR an UBA am 24.11.2022; Mengen gerundet auf 100 t/a)

3.6.2 Pfadbeschreibung

Abbildung 22 zeigt die Pfadbeschreibung für die Sortierung und Verwertung für PET-Verpackungen. Als Grundlage der Erläuterung und der Reihenfolge der Prozesse dienten die beiden Erhebungen zur Ermittlung der Praxis der SuV, die Publikation UBA-TEXTE 11/2021 (Dehoust et al., 2021) sowie der Anforderungs- und Bewertungskatalog von cyclos-HTP in der Version 5.1 (Institut cyclos-HTP GmbH, 2022).

Bei PET bestehen besonders hohe Anforderungen an den Verwertungsprozess, da PET zu einem großen Anteil wieder im Verpackungsbereich eingesetzt wird (Kauertz & Detzel, 2017). Die Fraktionen „PET-Flaschen, transparent“ (325) und „Misch-PET“ (328-(1-3)) sowie vereinzelt auch „PET-Schalen“ (328-5 und -6) werden in den LVP-Sortieranlagen über NIR-Trenner abgetrennt und den Verwertern bereitgestellt. Abhängig vom Endprodukt werden die genannten Fraktionen im Menü verwertet. Dazu werden in einigen Anlagen auch aus Gründen der Produktqualität Mengen aus dem Pfandsystem mitverarbeitet.

S1 (≤ 20 mm) und S2 (30 mm – 60 mm) kennzeichnen die zwei verschiedenen Sortierprozessvarianten und unterscheiden sich in der Maschenweite bei der Feinkornabsiebung in der LVP-Sortieranlage. S– umfasst die Anlagen, die die genannten PET-Fraktionen nicht aussortieren und für ein Recycling bereitstellen. Nach der Öffnung der Ballen

¹⁴ Inkl. Informationen aus dem Vollzug.

und der Abtrennung des Bindedrahtes werden in einer Vorsortierung in einigen Anlagen Störstoffkomponenten mittels NIR-Trenner aussortiert. Die Wahl der Komponenten hängt insbesondere vom Endprodukt ab. Die meisten PET-Verwerter gaben an, PET-Multilayer-Schalen sowie PET-Flaschen mit Full-Sleeve vorab mittels NIR und teilweise auch zusätzlich manuell auszusortieren. Üblicherweise findet zusätzlich eine Farbsortierung statt, bei der die Verpackungen nach Farben sortiert werden (Kauertz & Detzel, 2017).

Anschließend werden die Verpackungen zu Mahlgut zerkleinert und gewaschen. Der Waschprozess wird mehrstufig vor und nach der Dichtentrennung ausgeführt. Mindestens eine der Wäschen wird bei allen Anlagen als Heißwäsche bei Temperaturen zwischen 70 °C und 85 °C und unter Zugabe von Natronlauge ausgeführt. In einigen Anlagen werden zusätzlich Detergenzien beigelegt. Durch den Waschprozess werden Fette, Klebstoff-, Papieretiketten-, Lebensmittelrückstände und Schmutzpartikel entfernt (Knappe et al., 2021; Tschachtli et al., 2019).

Mittels einer Dichtentrennung bei 1 g/cm³ werden polyolefinische (PO) Kunststoffe als Schwimmgut abgetrennt. Separiert werden beispielsweise Verschlüsse und Ringe aus HDPE oder Etiketten aus PE- und PP-Folien. Bei allen befragten Anlagen wird die Dichtentrennung als Schwimm-Sink-Trennung über Verfahren wie Schwimm-Sink-Becken ausgeführt. Das abgetrennte Schwimmgut aus PO stellt ein Nebenprodukt dar, welches als PO-Mahlgut hochwertig werkstofflich verwertet werden kann. Das Sinkgut PET-Mahlgut (auch als Flakes bezeichnet) durchläuft anschließend die zweite Waschstufe. Eine detaillierte Beschreibung der verschiedenen Technologien zur Dichtentrennung (Schwimm-Sink-Becken, Hydrozyklon, Zentrifuge) kann in UBA-Texte 92/2021 nachgelesen werden (Knappe et al., 2021). Anschließend folgt die Trocknung (mechanisch/thermisch).

Um Störstoffe im Endprodukt zu reduzieren, durchlaufen die Flakes eine mehrstufige Nachsortierung. Dazu gehören Windsichtung, Farb- und Materialsortierung sowie Metallabscheidung. Dabei werden Folienreste, Fremdkunststoffe und Metalle abgetrennt sowie bunte von klaren Flakes separiert (Knappe et al., 2021). Bei allen befragten Anlagen wurde gewaschenes Mahlgut (Flakes) als Endprodukt angegeben (V1). Bei Vermarktung des Mahlguts können Recyclingunverträglichkeiten, wie PA-Additivierung oder Klebstoffreste erst nachträglich im Umschmelzprozess sichtbar werden (Bünemann et al., 2016). Im Umschmelzprozess von PET-A werden hohe Temperaturen verwendet, bei denen sich die meisten anderen Kunststoffe zersetzen und damit das Endprodukt negativ beeinflussen können (Christiani & Beckamp, 2020; Institut cyclos-HTP GmbH, 2022). PA-Copolymere können das Endprodukt gelblich verfärben (Knappe et al., 2021).

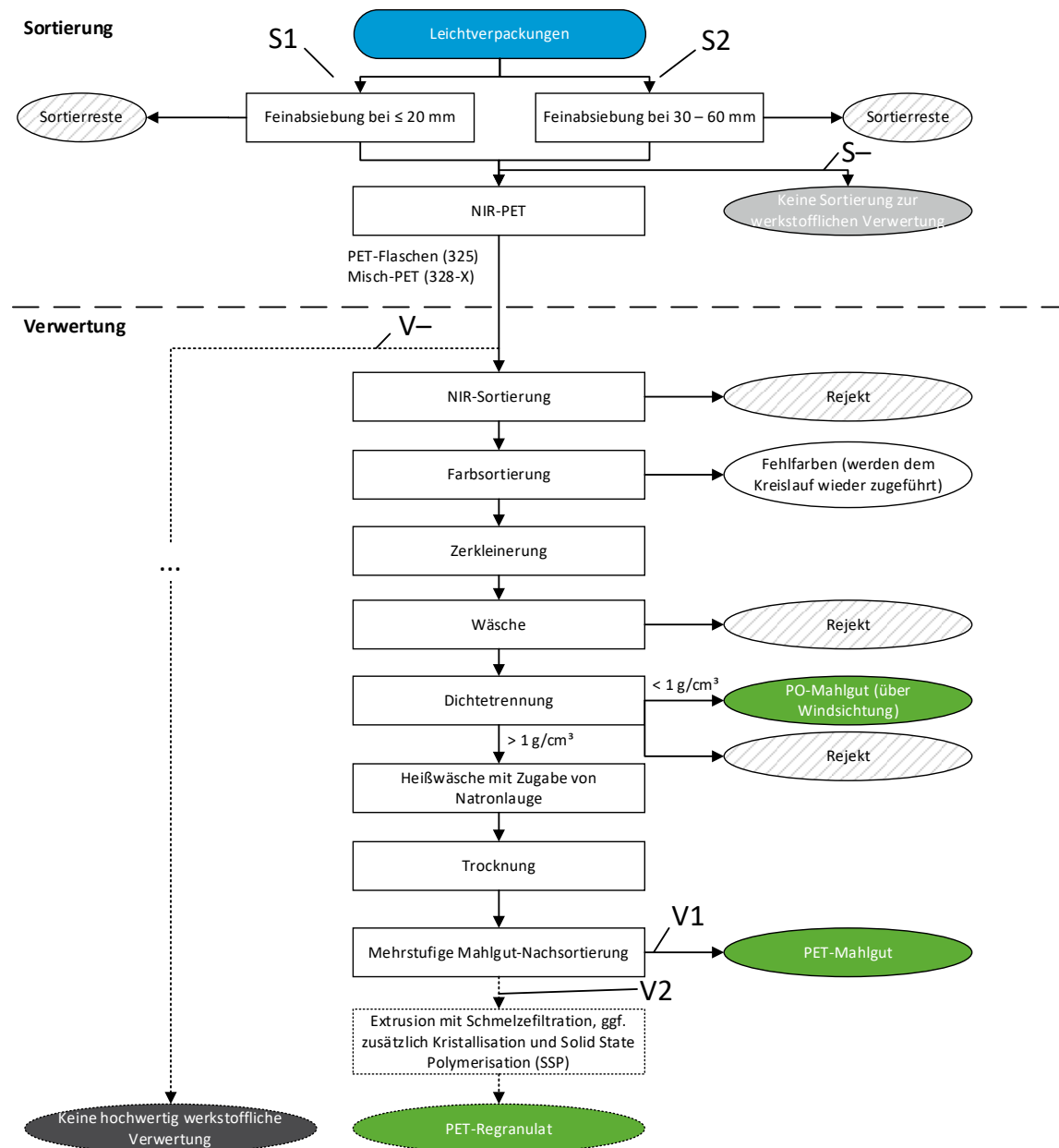
Wenige Anlagen machten zusätzlich die Angabe, dass auch direkt in der Verwertungsanlage PET-Regranulat hergestellt wird (V2). Die PET-Verwerter gaben an, dass sie eine Extrusion mit Schmelzefiltration durchführen. Bei der Extrusion werden die sortierten Flakes bei hohen Temperaturen in einem Extruder aufgeschmolzen und granuliert. Im Umschmelzprozess sind insbesondere die Bestandteile (z. B. Additive oder Blends) im Regranulat problematisch, die sich im Schmelzprozess zersetzen und eine geringe Schmelztemperatur gegenüber der Verarbeitungstemperatur (ca. 260 °C – 300 °C) besitzen (Tschachtli et al., 2019). Diese Bestandteile können die Eigenschaften des finalen Rezyklats verändern. Höher schmelzende Bestandteile können als Rückstand über Schmelzefiltration separiert werden. Nachteilig ist dabei der Aufwand für die Reinigung des Filtersiebes sowie der Ausbeuteverlust (Tschachtli et al., 2019). Nur vereinzelte Anlagen gaben an, dass eine SSP (Solid State Polymerisation) direkt im Prozess integriert ist. Im SSP-Prozess werden die PET-Flakes bei hohen Temperaturen mehrere Stunden einem Unterdruck ausgesetzt. Dabei verflüchtigen sich unerwünschte Stoffe und eine definierte Viskosität wird erreicht. Die PET-Moleküle werden polykondensiert sowie

kristallisiert. Mit diesem Prozess kann ein Regranulat hergestellt werden, welches einen vergleichbaren Polymerisations- und Kristallisationsgrad wie Neuware aufweist (Kauertz & Detzel, 2017; Knappe et al., 2021). Die Wahrscheinlichkeiten von V1 und V2 müssen aus wettbewerbsrechtlichen Gründen zusammengefasst werden.

Weitere Prozessschritte wurden von den befragten Anlagen nicht angegeben. In keiner der befragten Anlagen wurden lösemittelbasierte Verfahren oder das Verwertungsverfahren der United Resource Recovery Corporation URRC (Friedl, 2022a) als Wasch- und Oberflächenbehandlung im industriellen Maßstab angewendet. Generell ist festzustellen, dass Verfahrensprozesse, die bei anderen Kunststofffraktionen wenige oder keine Verwertungsanlagen durchführen, in der PET-Verwertung zum Standard gehören (z. B. Heißwäsche, Farbsortierung).

Bei Betrachtung der Recyclingfähigkeit von PET-Schalen kann zwischen Monolayer- und Multilayer-PET-Schalen unterschieden werden, da sich das Design der Schalen voneinander unterscheidet. Monolayer-PET-Schalen bestehen aus reinem PET und werden beispielsweise für Gemüse und Obst verwendet. Bei Multilayer-PET-Schalen werden zusätzlich als Siegel- oder Barrierschicht andere Polymere, wie z. B. PE, EVOH oder PA eingesetzt. Ein PET-Verwerter gab an, dass PE das Endprodukt milchig und PA das Endprodukt gelblich verfärben könne. Laut Industrievereinigung Kunststoffverpackungen e. V. (IK) werden Multilayer-PET-Schalen überwiegend für Produkte wie Käse oder Wurst verwendet. Der Marktanteil für Monolayer-PET-Schalen beträgt gemäß IK 40 % und für Multilayer-PET-Schalen 60 % (IK Industrievereinigung Kunststoffverpackungen e.V., 2021).

Abbildung 22: Schematische Darstellung der Pfadbeschreibung für die Sortierung und Verwertung von PET-Verpackungen (i. d. R. PET-Flaschen)



Legende und Erläuterung

- Ausgangsmaterial
- Nebenprodukt (energetische Verwertung)
- Sonstige Nebenprodukte
- Wahrscheinlichkeiten der Varianten werden nicht in die Anwendungsgrade einberechnet
- Hauptprodukt (hochwertige werkstoffliche Verwertung)
- Prozessstufe
- Geringe Mengenrelevanz der Zweigwahrscheinlichkeiten

Quelle: eigene aktualisierte Darstellung nach Grummt (2022), Umweltbundesamt, auf Grundlage von Dehoust et al. (2021)

3.6.3 Ermittlung der Praxis der SuV für PET

Aus den Verarbeitungsmengen der LVP-Sortierer für 2022, als auch aus den Verwertungszuführungsmengen aus dem MSN 2021, kann $P(A_{SuV})$ bestimmt werden. Alle befragten PET-Verwerter gaben Endprodukte an, bei denen der Prozess durch eine hochwertige werkstoffliche Verwertung als Referenzprozess angesehen werden kann.

Für transparente PET-Flaschen sowie sonstige formstabile PET-Verpackungen wurde eine Spannweite zwischen Worst Case und Best Case der Anteile in den PET-Fractionen bestimmt. Die Methode ist im Abschnitt 2.2 erläutert. Für transparente PET-Flaschen beträgt die Spannweite 81,8 % – 85,2 %.

In Abbildung 23 wurden für $P(A_{SuV})$ beispielhaft die Mindest-Anteile an transparenten PET-Flaschen gemäß der folgenden Spezifikationen in der Verwertung einberechnet: 325 (100 %), 328-0 (100 %), 328-1 (90 %), 328-2 (70 %), 325-3 (50 %). $P(A_{SuV})$ beträgt in diesem Beispiel 85,2 %. Die Pfadwahrscheinlichkeit $P(S1,V1/V2)$ mit ca. 47 % wird als Stand der Technik eingestuft. Bei diesen Varianten werden auch kleine Verpackungen sortiert (Feinkornabsiebung bei ≤ 20 mm) und anschließend hochwertig werkstofflich verwertet. Als sonstige betriebliche Praxis wurde $P(S2,V1/V2)$ mit ca. 39 % ermittelt. Diese Wahrscheinlichkeit umfasst eine Feinkornabsiebung bei 30 mm – 60 mm sowie eine hochwertige werkstoffliche Verwertung. Die Wahrscheinlichkeiten, dass keine hochwertige werkstoffliche Verwertung stattfindet (Varianten mit V–), betragen insgesamt etwa 15 %.

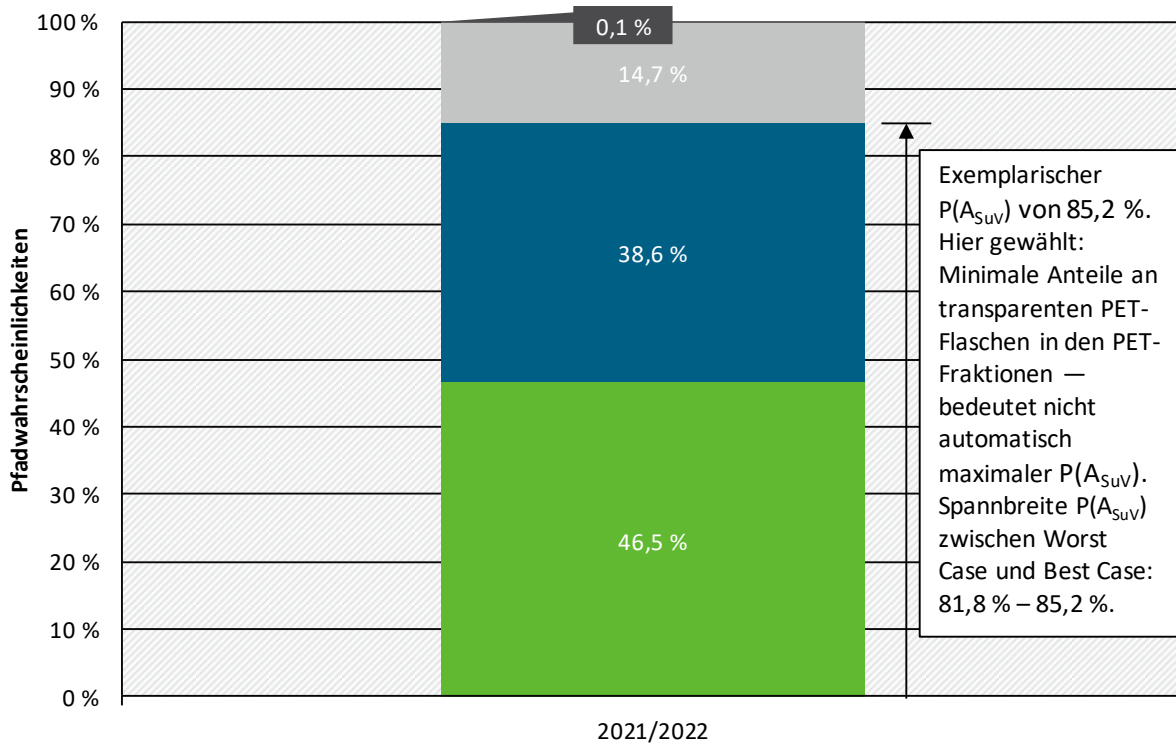
Wie zuvor für die PET-Flaschen beschrieben, wurde auch für die sonstigen formstabilen PET-Verpackungen eine Spannweite bestimmt. Diese beträgt zwischen 1,1 % und 30,1 %. Die Methode dazu ist detailliert im Abschnitt 2.2 erläutert. Ein Anwendungsgrad von 1,1 % ergibt sich, wenn sonstige PET-Verpackungen ausschließlich über die Fractionen 328-5 und 328-6 („PET-Schalen“) hochwertig werkstofflich verwertet werden. Die darüber liegenden Werte innerhalb der Spannweite kämen zustande, wenn auch sonstige formstabile PET-Verpackungen in den anderen Misch-PET-Fractionen hochwertig werkstofflich verwertet würden. PET-Verwerter gaben an, dass transparente Mono-PET-Schalen teilweise mit transparenten PET-Flaschen gemeinsam recycelt werden können (siehe Abschnitt 3.6.6).

In Kapitel 4 wird auf dieser Basis eine Empfehlung für die Einordnung transparenter PET-Flaschen und sonstiger formstabiler PET-Verpackungen im Anhang 1 des Mindeststandards ausgesprochen.

An dieser Stelle sei erwähnt, dass uns aktuelle Bestrebungen bekannt sind, Kapazitäten für die Verwertung der PET-Schalenfraction aus deutschen Systemmengen aufzubauen (E-Mail von Hr. Dr. Christiani am 25.04.2023).

Abbildung 23: Praxis der SuV für PET-Flaschen, transparent; exemplarischer $P(A_{SuV})$ der PET-Fraktionen 325 und 328-(0-3) mit minimalen Anteilen an transparenten PET-Flaschen gemäß Spezifikation und Angabe der Spannweite für $P(A_{SuV})$ für PET Flaschen, transparent (Bezugsjahre 2021/2022)

Exemplarischer Anteil der Fraktionen 325 (100 %), 328-0 (100 %), 328-1 (90 %), 328-2 (70 %), 328-3 (50 %) mit minimalen Anteilen an PET-Flaschen, transparent gemäß Spezifikation



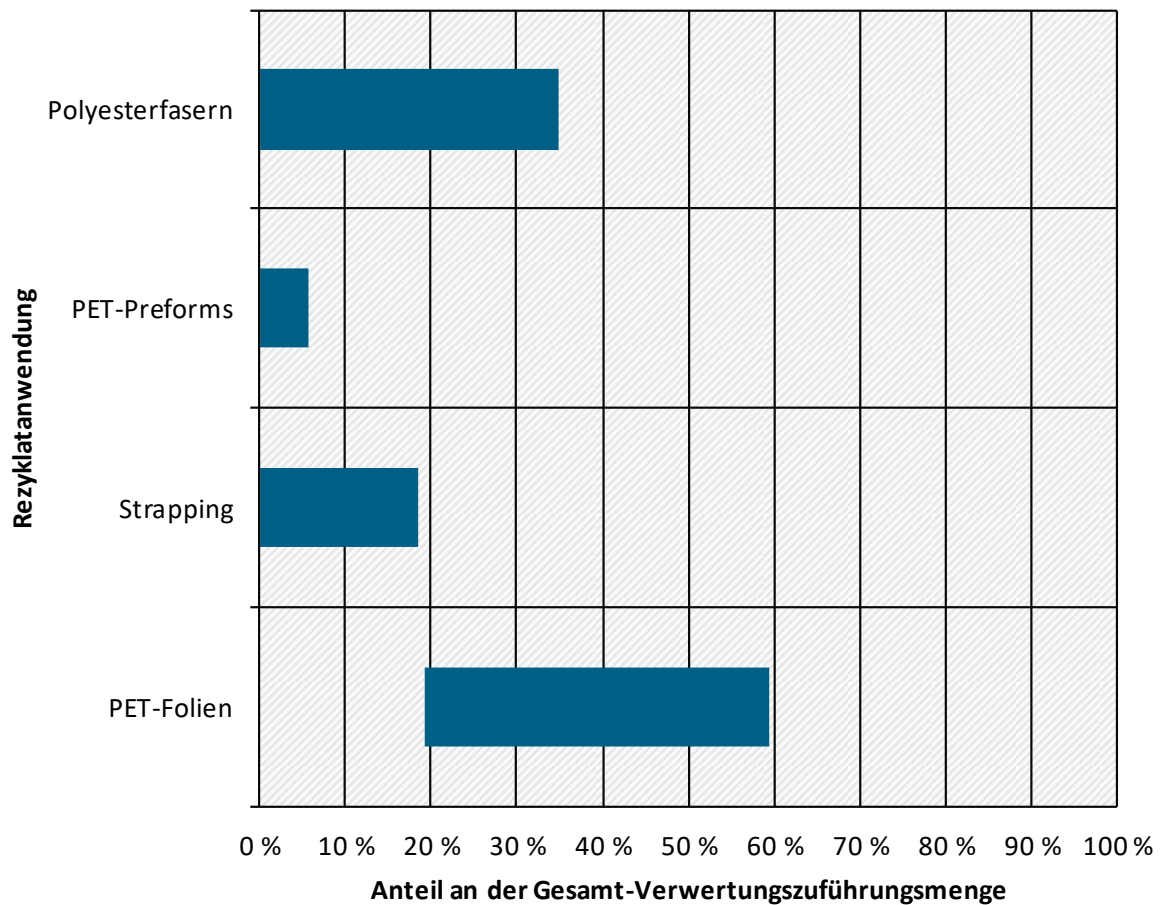
- Bezugsjahr**
- $P(S1,V-) + P(S2,V-)$: keine hochwertig werkstoffliche Verwertung
 - $P(S-)$: keine Sortierung für werkstoffliche Verwertung
 - $P(S2,V1/V2)$: sonst. betriebliche Praxis
 - $P(S1,V1/V2)$: Stand der Technik

Quelle: eigene Darstellung, Umweltbundesamt, auf methodischer Grundlage von Dehoust et al. (2021)

3.6.4 Rezyklatanwendungen

Abbildung 24 zeigt die von den Verwertern von PET-Verpackungen angegebenen Rezyklatanwendungen. Bei den Verwertern mit Referenzanlagen wurden überwiegend PET-Folien und Polyesterfasern (für z. B. technische Anwendungen) angegeben. Einige Referenzanlagen nannten als Rezyklatanwendungen PET-Umreifungsbänder (sogenanntes „Strapping“). PET-Preforms wurden nur von wenigen PET-Verwertern angekreuzt.

Abbildung 24: Rezyklatanwendungen der Referenzanlagen (Bezugsjahr 2021) für die Verwertung von PET-Verpackungen¹⁵



Quelle: eigene Darstellung, Umweltbundesamt

3.6.5 Einstufung problematischer Verpackungsmerkmale bei der Verwertung

Die Erhebung bot den PET-Verwertern die Möglichkeit, eine Einschätzung zur Relevanz problematischer Verpackungsmerkmale zu geben, welche spezifische Probleme im Verwertungsprozess verursachen können. Die dazugehörigen Ergebnisse sind in Tabelle 8 dargestellt. Als Basis dafür dienten die im Anhang 3 des Mindeststandards 2021 aufgeführten Recyclingunverträglichkeiten (ZSVR, 2021, S. 29). Zusätzlich abgefragt wurde der Punkt „PET-C-Etiketten/Sleeves“ (PET-C steht für kristallines PET). Des Weiteren konnten von den Verwertern zusätzliche Angaben (gelistet unter „Weitere Angaben“) zu problematischen Verpackungsmerkmalen gemacht werden. Diese konnten ebenso von den Verwertern hinsichtlich ihrer Relevanz eingeschätzt werden.

¹⁵ Aus wettbewerbsrechtlichen Gründen wurde die Spannweite geringfügig manipuliert.

**Tabelle 8: Einschätzung der PET-Verwerter zu problematischen Verpackungsmerkmalen
(Gesamtanzahl an Referenzanlagen: 9)**

Problematische Verpackungsmerkmale	Problem unbekannt	kein Problem	Problem nicht gelöst, aber aufgrund geringer Mengenrelevanz bedeutungslos	Problem bekannt, technisch		keine Angabe
				weitgehend gelöst	nicht gelöst	
PET-G-Komponenten	0	0	1	2	5	1
POM-Komponenten	2	0	3	2	0	2
PVC-Komponenten	0	0	2	5	2	0
EVOH-Schichten	2	0	2	2	2	1
PA-Monolayer-Schichten für transparente PET-Flaschen, farblos und „light-blue“	0	0	3	2	2	2
PVC-, PS-, PET-G-Etiketten/Sleeves	0	0	2	1	6	0
PET-C-Etiketten/Sleeves	0	1	1	2	4	1
Sonstige blended barriers	2	0	2	0	4	1
PA-Additivierung für transparente PET-Flaschen, farblos und „light-blue“	1	0	2	0	5	1
Nicht ablösbare (abwaschbare) Klebstoffapplikationen (in Wasser oder alkalisch bei 80 °C)	3	0	2	0	4	0
Nicht magnetische Metalle	0	0	0	9	0	0
Elastomer-Komponenten der Dichte > 1 g/cm ³	4	0	0	2	3	0
Direktdruck (abgesehen von Produktionscode und MHD)	1	2	3	1	2	0
Silikonkomponenten	3	0	1	2	3	0
Weitere Angaben:						
Verbundfolien					2	
Opak/weiß					2	
Schwarze Verpackungen					2	

Quelle: Tabelle basierend auf Grummt (2022) und der aktuellen Erhebung, auf methodischer Grundlage von Dehoust et al. (2021)

Es ist festzustellen, dass die Angaben im Anhang 3 überwiegend von den Verwertern bestätigt werden. „Nicht magnetische Metalle“ und POM-Komponenten wurden von keinem Verwerter als nicht gelöstes Problem angesehen. Dennoch stufte keiner der Verwerter die beiden Aspekte als „kein Problem“ ein. Wir empfehlen, alle im Anhang 3 des Mindeststandards aufgelisteten Punkte weiterhin beizubehalten. Die Aufnahme von „PET-C-Etiketten/Sleeves“ wurde bereits in den EK III eingebracht. Im Folgenden werden die zusätzlich angegebenen Verpackungsmerkmale diskutiert:

- ▶ Für opake PET-Verpackungen (dazu zählen auch weiß pigmentierte PET-Flaschen) besteht kein Verwertungspfad. Diese stellen einen Störstoff im Recyclingprozess dar. Im Anhang 1 Spalte 5 des Mindeststandards 2022 sind „opake PET-Flaschen und andere PET-Artikel“ bereits außerhalb der Spezifikation aufgelistet (ZSVR, 2022). Für den Mindeststandard besteht demnach kein Handlungsbedarf.
- ▶ Verbundfolien wurden von 2 der 9 antwortenden PET-Verwerter als nicht gelöstes Problem betrachtet. Da die PET-Fraktionen auf formstabile Kunststoffe abzielen, sind Verbundfolien in diesen Fraktionen unerwünscht. Wenn die Verbundfolien eine Recyclingunverträglichkeit darstellen sollten, sollte dies vom EK III geprüft werden.

3.6.6 Störstoffkomponenten im Rejekt

Die PET-Verwerter wurden befragt, welche Fraktionen dem Rejekt bei der Vorsortierung zu Beginn des Verwertungsprozesses zugeführt werden. Diese Abfrage wurde bereits von Dehoust et al. (2021) durchgeführt. In Tabelle 9 sind die Ergebnisse dieser Einschätzung dargestellt. 4 der 9 PET-Verwerter gaben an, dass PET-Multilayer-Schalen als Störstoff mittels NIR-Trenner aussortiert werden. Des Weiteren sortieren 3 der 9 PET-Verwerter Flaschen mit Full-Sleeve über NIR-Trenner aus. PET-Monolayer-Schalen, Flaschen mit PA-Barriere, Flaschen mit Teil-Sleeve, Nicht-Getränkeflaschen sowie Flaschen mit Funktionsverschlüssen werden hingegen von keinem antwortenden PET-Verwerter gemäß der Befragung ausgeschleust. Auf Nachfrage bei PET-Verwertern gaben diese an, dass transparente PET-Monolayer-Schalen zum Teil gemeinsam mit transparenten PET-Flaschen recycelt werden können.

Tabelle 9: Störstoffkomponenten im Rejekt nach Einschätzung der PET-Verwerter (Gesamtanzahl an Referenzanlagen: 9)

Störstoffkomponente	Anzahl
PET-Monolayer-Schalen	
PET-Multilayer-Schalen	4
Flaschen mit Funktionsverschlüssen	
Nicht-Getränkeflaschen	
Flaschen mit PA-Barriere (wie Saftflaschen)	
Flaschen mit Teil-Sleeve	
Flaschen mit Full-Sleeve	3
Weitere Angaben:	
Verpackungsbänder	1

Störstoffkomponente	Anzahl
Folien	1
Nicht-PET (Metalle, Textilien, Holz)	1

Quelle: Tabelle basierend auf Grummt (2022) und der aktuellen Erhebung, auf methodischer Grundlage von Dehoust et al. (2021)

3.7 Aufbereitung und Verwertung von Eisenmetallen und Eisenmetallverbunden

3.7.1 Rücklauf der Erhebung

An insgesamt 55 Aufbereiter und Verwerter von Eisenmetallverpackungen wurden erstmals für diesen zweiten Teilbericht Erhebungsbögen versendet. Mit 13 ausgefüllten Erhebungsbögen wurde eine Rücklaufquote von 24 % erreicht. Für Verwerter von Weißblech mit Standort in Deutschland wurde eine Rücklaufquote von 26 % erzielt. Die Gesamtzuführungsmenge der Verwertungsanlagen aus den MSN 2021, die einen Erhebungsbogen zurücksendeten, liegt für Aufbereitungs- und Verwertungsanlagen in 2021 bei ca. 108.000 t (gerundet auf 1.000 t/a). Damit wurden 38 % der Gesamtzuführungsmenge aller Aufbereiter und Verwerter von Weißblechverpackungen aus dem MSN 2021 abgedeckt. Dieser abgedeckte Mengenanteil liegt nicht über 70 % der Gesamtzuführungsmenge und wird damit nicht als repräsentativ angesehen. Es bedarf hier zukünftig einer Verbesserung der Datenbasis.

Berücksichtigt wurden Anlagen, welche unter den Kontoklassen „Aufbereitungsanlage“ und „Verwertungsanlage“ (Bezugsjahr 2021) eingestuft wurden¹⁶. Dabei wurden nur die Fraktionen 410 und 412 (Weißblech) einbezogen. Laut den Prüfleitlinien Mengenstromnachweise können Aufbereitungsanlagen für Weißblechverpackungen Letztempfänger sein:

„Mechanische Aufbereitungsanlagen von Weißblech und Weißblechverbunden können als Letztempfänger eingestuft werden, wenn die Anlage geeignet ist, dass spezifische Material zu verarbeiten und das erzeugte Produkt ohne weitere abfallspezifische Behandlungsschritte in einem Produktionsprozess (z.B. Stahlwerk oder Gießerei) eingesetzt werden kann (z.B. über Schredder, Querstromzerspaner oder Paketierung); dies ist im Prüfbericht zu dokumentieren.“ (ZSVR, 2020)

Fünf weitere Anlagen meldeten sich mit den folgenden Antworten zurück, weshalb von einer höheren Rücklaufquote und einem etwas höheren abgedeckten Mengenanteil ausgegangen wird:

1. Drei Anlagen meldeten, dass generell oder im letzten Jahr keine Systemmengen aus der Sammlung der dualen Systeme aufbereitet oder verwertet werden/wurden.
2. Zwei Anlagen gaben an, dass es sich nur um Händler handle.

¹⁶ Die Klassifizierung von Anlagen in Kontoklassen wird gemäß der ZSVR von Sachverständigen im Rahmen der Erstellung von Anlagenzertifikaten vorgenommen und anschließend von Beteiligten im Softwareprogramm wme.fact erfasst. Die Systembetreiber liefern der ZSVR jährlich im Rahmen der MSN Unterlagen, die die Einstufungen der Kontoklassen beinhalten.

Die Angaben der einzelnen Anlagen werden zum Schutz von Betriebs- und Geschäftsgeheimnissen und aus wettbewerbsrechtlichen Gründen vertraulich behandelt und nicht veröffentlicht.

Erhebungsbogen Aufbereiter und Verwerter von Eisenmetallen

- ▶ Rücklaufquote „Aufbereitungsanlagen“ und „Verwertungsanlagen“: im In- und Ausland: 24 % (13/55); im Inland: 26 % (13/50)
- ▶ Gesamtzuführungsmenge der Aufbereiter und Verwerter, die Erhebungsbögen zurücksendeten, aus MSN 2021: ca. 108.000 t; entspricht 38 % der Gesamtmenge aller Eisenmetallaufbereiter und -verwerter i. H. v. ca. 280.100 t (Datenübermittlung ZSVR an UBA am 24.11.2022; Mengen gerundet auf 100 t/a)

3.7.2 Pfadbeschreibung

Abbildung 25 die Pfadbeschreibung für die Sortierung und Verwertung von Verpackungen aus Weißblech und Weißblechverbunden. Zu Letzteren gehören beispielsweise Kronenkorken, Metallclips mit Papier oder Kunststoff oder Nockendrehverschlüsse (Schüler & Wilhelm, 2023).

Die Grundlage für die Pfadbeschreibung und den Text dieses Abschnitts bilden die aktuelle erstmalige Befragung der Weißblechaufbereiter und -verwerter für den vorliegenden Teilbericht 2 sowie die Publikation UBA-TEXTE 11/2021 (Dehoust et al., 2021) und der Anforderungs- und Bewertungskatalog von cyclos-HTP in der Version 5.1 (Institut cyclos-HTP GmbH, 2022). Laut Dehoust et al. wird die Weißblechfraktion „generell einer hochwertigen werkstofflichen Verwertung zugeführt“ (Dehoust et al., 2021, S. 156). Die Unterschiede liegen in den unterschiedlichen Ausführungen der Feinkornabsiebung in den LVP-Sortieranlagen.

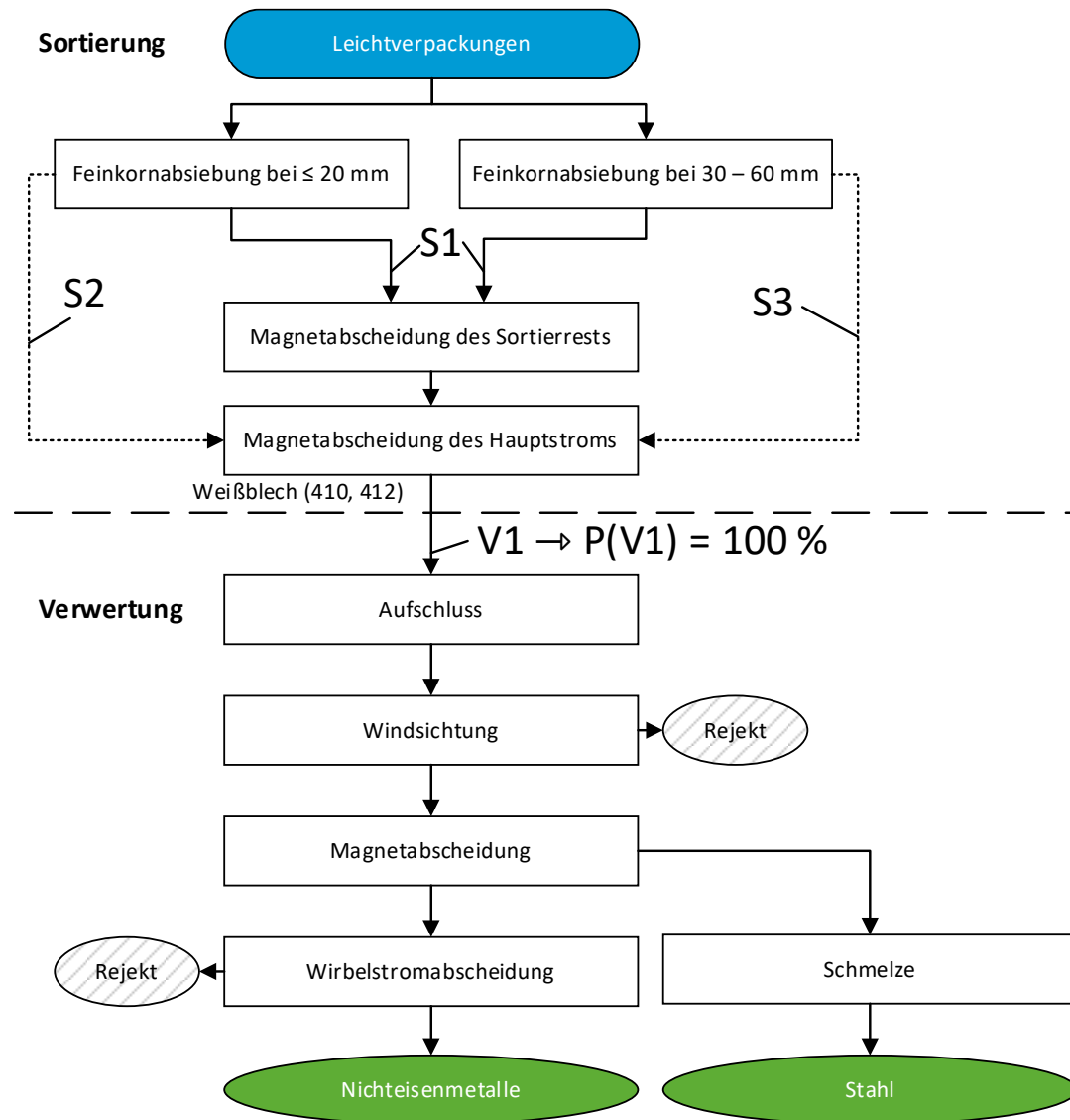
In LVP-Sortieranlagen werden ferromagnetische Eisenmetalle über Magnetabscheidung abgetrennt und als Fraktion bereitgestellt. Hierbei werden auch Verbundverpackungen mit Eisenmetallen aussortiert, z. B. auch Kombidosen mit Weißblechboden (Dehoust et al., 2021). Es werden drei verschiedene Sortierprozessvarianten unterschieden. Anlagen, die den Sortierrest noch einer Magnetabscheidung unterziehen, werden der Sortierprozessvariante S1 zugeordnet. Zudem gibt es Anlagen, die bei einer Maschenweite von ≤ 20 mm absieben (S2) sowie Anlagen, die den Trennschnitt bei 30 mm – 60 mm durchführen (S3) und den Sortierrest keiner Magnetabscheidung unterziehen.

Für den vorliegenden Teilbericht 2 wurden erstmalig auch die Weißblechaufbereiter und -recycler befragt. Einige Anlagenbetreiber gaben an, dass zu Beginn des Prozesses Gasdruckflaschen manuell aussortiert werden. Das Restgas wird manuell rausgelassen, da das Restgas im Prozess stören könne. Stand der Praxis sind die anschließenden Prozesse Mechanischer Aufschluss, Windsichtung, Magnetabscheidung und Wirbelstromabscheidung. Der mechanische Aufschluss durch Zerkleinerer ermöglicht eine Separation von NE-Metallen (insbesondere Aluminium) sowie Etiketten, Kunststoffen und Verschmutzungen. Dieser Prozess wird auch als „Shreddern“ bezeichnet. Über Windsichtung können lose Etiketten abgetrennt werden. Eine Magnetabscheidung ermöglicht die Separation der Eisenmetalle und eine Wirbelstromabscheidung sorgt für die Abtrennung der NE-Metalle.

Eine Entzinnung scheint laut der aktuellen Befragung keine generelle Praxis darzustellen. Dieses Ergebnis stimmt mit einer Studie des Ökoinstituts e.V. (Bulach et al., 2022, S. 47) sowie einem Paper von Sauter et al. (Sauter et al., 2021) überein. Zinn ist im Stahlwerksprozess metallurgisch unerwünscht, weshalb eine Trennung zwischen zinnhaltigem Schrott (i. d. R. Weißblech) von anderen Stahlschrotten von Vorteil ist. Durch den Entzinnungsprozess könnte das Zinn

zurückgewonnen werden. Ein Anlagenbetreiber gab an, dass eine Entzinnung bei starker Verunreinigung, wie z. B. Lackierungen oder Beschichtungen schwierig sei. Der Zinngehalt sei gemäß des Anlagenbetreibers generell gering (ca. 0,2 %).

Abbildung 25: Schematische Darstellung der Pfadbeschreibung für die Sortierung und Verwertung von Verpackungen aus Weißblech und Weißblechverbunden



Legende und Erläuterung

- Ausgangsmaterial
- Nebenprodukt (energetische Verwertung)
- Hauptprodukt (hochwertige werkstoffliche Verwertung)
- Prozessstufe
- Geringe Mengenrelevanz der Zweigwahrscheinlichkeiten

Quelle: eigene aktualisierte Darstellung nach Grummt (2022), Umweltbundesamt, auf Grundlage von Dehoust et al. (2021)

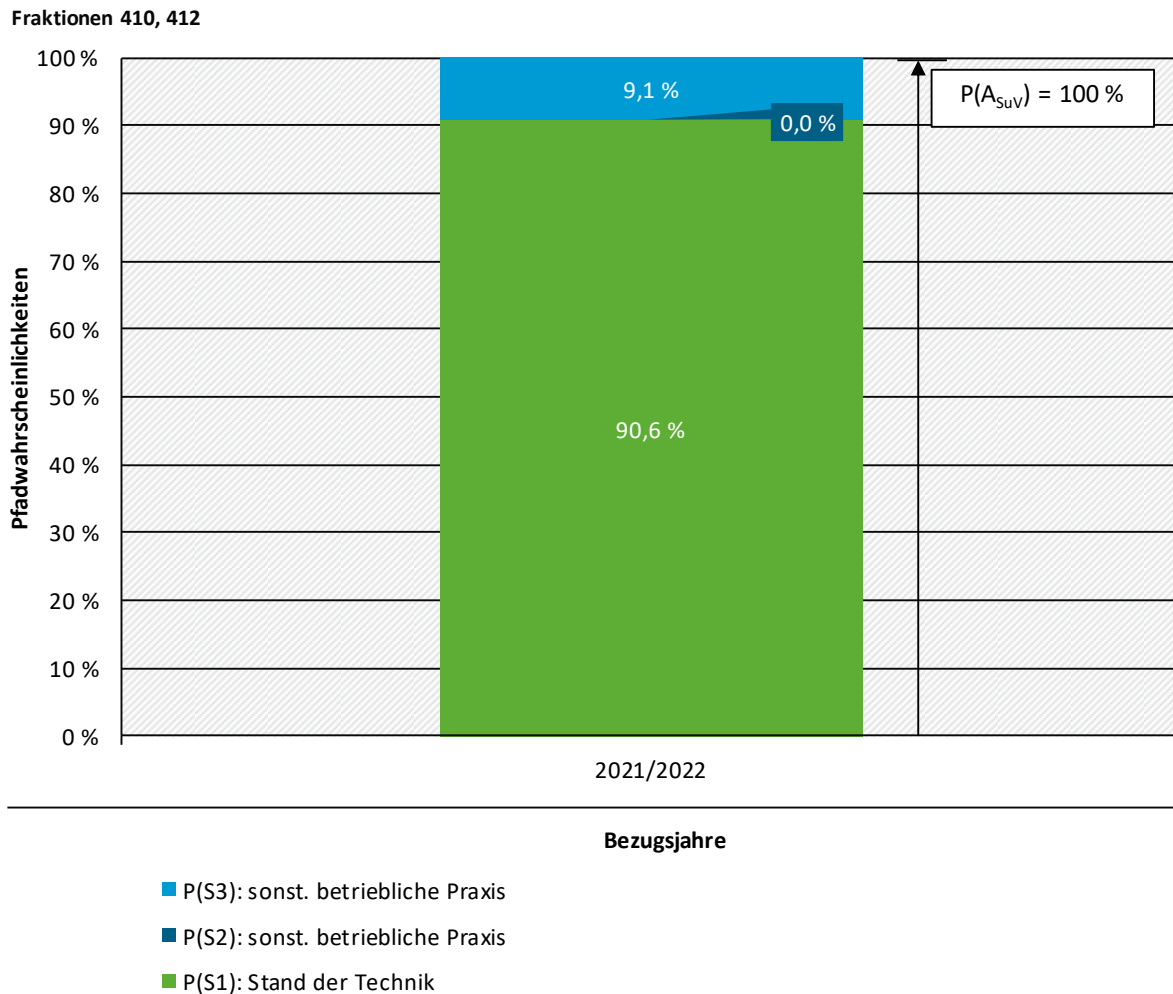
3.7.3 Ermittlung der Praxis der SuV für Eisenmetalle und Eisenmetallverbunde

Aus den Verarbeitungsmengen für der LVP-Sortierer kann $P(A_S)$ für Verpackungen aus Eisenmetallen berechnet werden. Aus den Verwertungszuführungsmengen aus dem MSN 2021 der Eisenmetallaufbereiter und -verwerter kann $P(A_V)$ berechnet werden. Da alle LVP-Sortieranlagen Weißblechfraktionen sortieren und für ein Recycling bereitstellen, beträgt $P(A_S) = 100\ %$. Nach Definition des Mindeststandards 2022 werden alle Anlagen als Referenzanlagen eingestuft, demnach beträgt $P(A_V)$ ebenso $100\ %$. Aus einer Multiplikation von $P(A_S)$ mit $P(A_V)$ ergibt sich $P(A_{SuV}) = 100\ %$. Die Verteilung der Mengen ist in Abbildung 26 dargestellt.

Es kann zwischen drei verschiedenen Pfadwahrscheinlichkeiten unterschieden werden $P(S1,V1)$, $P(S2,V1)$ und $P(S3,V1)$. Die Verwertungszuführung für Verpackungen aus Eisenmetallen wird insbesondere von den Bedingungen in der LVP-Sortierung bestimmt. Hierbei liegt der Unterschied im Umgang mit dem Materialstrom aus der Feinkornabsiebung.

$P(S1)$ beträgt im Jahr 2022 $90,6\ %$ und beschreibt die Wahrscheinlichkeit für Variante S1, bei der die Verpackung über eine Feinkornabsiebung läuft und der Sortierrest anschließend einer Magnetabscheidung unterzogen wird. Wir definieren wie Dehoust et. al (2021) die Variante S1 als Stand der Technik, da diese Variante unabhängig vom Verpackungsformat ist. Die Variante S2, bei der eine Feinkornabsiebung bei $\leq 20\ \text{mm}$ stattfindet, der Sortierrest aber keine Magnetabscheidung durchläuft, wurde in 2021/2022 nicht praktiziert ($P(S2)$ ist $0\ %$). $P(S3)$ ist $9,1\ %$ in 2022. Bei Variante S3 findet eine Feinkornabsiebung bei $30\ \text{mm} - 60\ \text{mm}$ statt und der Sortierrest durchläuft keine Magnetabscheidung.

Abbildung 26: Praxis der SuV für 2021/2022 für Verpackungen aus Eisenmetallen und Eisenmetallverbunden



Quelle: eigene Darstellung, Umweltbundesamt, auf methodischer Grundlage von Dehoust et al. (2021)

3.7.4 Rezyklatanwendungen

Anlagen, die unter der Kontoklasse „Verwertungsanlagen“ im MSN 2021 (Datenübermittlung ZSVR an UBA am 24.11.2022; Erläuterung unter 3.7.1) eingestuft wurden, gaben Stahl und NE-Metalle als Endprodukte an. Die folgenden Rezyklatanwendungen wurden seitens der „Verwertungsanlagen“ genannt:

- Baustahlprodukte,
- Gussanwendungen in Gießereien,
- Verpackungen (z. B. Dosen).

Anlagen, die unter der Kontoklasse „Aufbereitungsanlagen“ im MSN 2021 Datenübermittlung ZSVR an UBA am 24.11.2022; Erläuterung unter 3.7.1) gebucht wurden, gaben Stahl und NE-Metalle als Endprodukte an.

Die folgenden Rezyklatanwendungen wurden seitens der „Aufbereitungsanlagen“ genannt:

- Verpackungen (z. B. Dosen),
- Automobilindustrie,
- Sonstige (diverse Stahlwerke).

3.7.5 Einstufung problematischer Verpackungsmerkmale bei der Aufbereitung und Verwertung

Die Erhebung bot den Eisenmetallaufbereitern und -verwertern die Möglichkeit, eine Einschätzung zur Relevanz problematischer Verpackungsmerkmale zu geben, welche spezifische Probleme im Verwertungsprozess verursachen können. Die dazugehörigen Ergebnisse sind in Tabelle 10 dargestellt. Als Basis dafür dienten die Angaben in der Negativliste des geleakten Entwurfs der EU-Verpackungsverordnung (European Commission, 2022b; Riebling, 2022, S. 25), eine Design-for-Recycling-Guideline (Gürlich et al., 2022) sowie der Austausch mit einem Experten im UBA. Des Weiteren konnten von den Verwertern zusätzliche Angaben (gelistet unter „Weitere Angaben“) zu problematischen Verpackungsmerkmalen gemacht werden. Diese konnten ebenso von den Aufbereitern und Verwertern hinsichtlich ihrer Relevanz eingeschätzt werden.

Tabelle 10: Einschätzung der Eisenmetallaufbereiter und -verwerter zu problematischen Verpackungsmerkmalen (Gesamtanzahl an Referenzanlagen: 13)

Problematische Verpackungsmerkmale	Problem unbekannt	kein Problem	Problem nicht gelöst, aber aufgrund geringer Mengenrelevanz bedeutungslos	Problem bekannt, technisch		keine Angabe
				weitgehend gelöst	nicht gelöst	
Komponenten aus anderen Stahllegierungen als üblich	5	3	2	1	0	2
Dickwandige Gasdruckflaschen oder-kartuschen	1	2	3	3	2	2
Konstruktionsbedingter Restinhalt	2	4	3	0	2	2
Verbundverpackungen	3	5	2	0	1	2
Komponenten aus PVC	4	4	3	0	0	2
Komponenten aus Blei (aus Fehlwürfen)	4	3	4	0	0	2
Weitere Angaben:						
<i>Nicht restentleerte Spraydosen (Deo, Haarspray etc.), erzeugen eine explosionsfähige Mischung im Prozess</i>				1		
<i>Dosen für Chips, hoher Papieranteil, wegen Feuchtigkeit hoher Gewichtsanteil Papier</i>				1		

Quelle: Tabelle basierend auf der aktuellen Erhebung

Es ist festzustellen, dass die Angaben überwiegend von den Aufbereitern und Verwertern als „Problem unbekannt“, „kein Problem“ oder „aufgrund geringer Mengenrelevanz bedeutungslos“ eingestuft wurden. Nur jeweils ein bis zwei Anlagenbetreiber stuften die genannten Aspekte als „nicht gelöst“ ein. Dickwandige Gasdruckflaschen oder -kartuschen wurden von zwei Anlagenbetreibern als nicht gelöstes Problem angesehen. Aus der Erhebung geht hervor, dass die meisten Anlagenbetreiber die Gasflaschen mit hohem Aufwand manuell heraussortieren und restentleeren. Der Aspekt der Gasdruckflaschen wurde bereits nach dem Teilbericht 1 in den EK III eingebracht.

Zum Problem „Komponenten aus anderen Stahllegierungen als üblich“ gab ein Anlagenbetreiber an, dass NE-Metalle heraussortiert werden und andere Legierungen i. d. R. nur aus der Wertstofftonne und nicht aus Weißblechverpackungen kämen. Wir sehen für den Mindeststandard derzeit keinen Handlungsbedarf.

Zum Punkt „Komponenten aus PVC“ machte ein Anlagenbetreiber die Angabe, dass der Kunststoffanteil bei Weißblechdeckeln früher aus PVC bestand. Dies sei heute üblicherweise nicht mehr der Fall. Wir sehen auch hier für den Mindeststandard keinen Handlungsbedarf.

Bleikomponenten würden sich gemäß eines Anlagenaufbereiters nur in Fehlwürfen befinden. Wir sehen auch hier keinen Handlungsbedarf für den Mindeststandard.

Ein Anlagenbetreiber gab zu dem Aspekt „Konstruktionsbedingter Restinhalt“ an, dass hier insbesondere gefährliche Inhalte kritisch seien, wie z. B. Lösungsmittel und Farben. Hierzu passt auch die zusätzlich genannte Angabe „Nicht entleerte Spraydosen“ eines Anlagenbetreibers, dass diese nicht vollständig entleerte Dosen eine explosionsfähige Mischung im Recyclingprozess bilden würden. Der Mindeststandard kann keinen Einfluss auf die Restentleerung durch die Verbraucher*innen nehmen. Im Mindeststandard 2022 wurde der Umgang mit konstruktionsbedingten Füllgutresten bereits konkretisiert und Beispiele aufgenommen (z. B. Silikone, Acrylate, Polyurethane) (ZSVR, 2022). Es besteht demnach vorerst kein weiterer Handlungsbedarf für den Mindeststandard.

Ein Anlagenbetreiber gab an, dass sich Chipsdosen aufgrund des Faseranteils mit Wasser vollsaugen würden und einen hohen Gewichtsanteil hätten. Nach unserer Einschätzung stellt dies keine Recyclingunverträglichkeit dar.

Wir empfehlen, vorerst keine der genannten Aspekte mit in den Mindeststandard aufzunehmen, soweit dies nicht bereits erfolgt ist.

3.8 Aufbereitung und Verwertung von Aluminium und Aluminiumverbunden

3.8.1 Rücklauf der Erhebung

An insgesamt 18 Aufbereiter und Verwerter von Verpackungen aus Aluminium, Aluminiumverbunden und aluminiumfolienhaltigen Verbunden wurden für diesen Teilbericht 2 erstmals Erhebungsbögen versendet. Mit 8 ausgefüllten Erhebungsbögen wurde eine Rücklaufquote von 41 % erreicht. Für Verwerter von Aluminium mit Standort in Deutschland wurde eine Rücklaufquote von 44 % erzielt.

Die Gesamtzuführungsmenge der Verwertungsanlagen aus den MSN 2021, die einen Erhebungsbogen zurücksendeten, liegt für Aufbereitungs- und Verwertungsanlagen in 2021 bei ca. 70.600 t (gerundet auf 100 t/a). Damit wurden 87 % der Gesamtzuführungsmenge aller Aufbereiter und Verwerter von Aluminiumverpackungen aus dem MSN 2021 abgedeckt. Dieser abgedeckte Mengenanteil liegt über 70 % der Gesamtzuführungsmenge und wird damit als

repräsentativ angesehen. Berücksichtigt wurden Anlagen, welche unter den Kontoklassen „Aufbereitungsanlage“ und „Verwertungsanlage“ (Bezugsjahr 2021) eingestuft wurden¹⁷. Dabei wurde nur die Fraktion 420 (Aluminium) einbezogen. Laut den Prüfleitlinien Mengenstromnachweise sind Pyrolyseanlagen grundsätzlich als Letzttempfänger zu klassifizieren (ZSVR, 2020). Gemäß Dehoust et. al (2021) sind mechanische Aufbereiter mit geringem Aufschluss mit Folgeempfängerstatus einzustufen und nicht als Letzttempfänger (Dehoust et al., 2021).

Drei weitere Anlagen meldeten sich mit den folgenden Antworten zurück, weshalb von einer höheren Rücklaufquote und einem etwas höheren abgedeckten Mengenanteil ausgegangen werden:

1. Eine Anlage meldete, dass der Input an Aluminiumverpackungen sehr gering sei und dass der Fragebogen deshalb nicht auf den Sortierbetrieb anwendbar sei. In der Tat wurden dieser Anlage nur geringe Mengen der Fraktion 420 zugeführt.
2. Eine Anlage gab an, dass Aluminiumverpackungen lediglich verdichtet und verpresst würden.
3. Eine Anlage wurde Ende 2021 stillgelegt.

Die Angaben der einzelnen Anlagen werden zum Schutz von Betriebs- und Geschäftsgeheimnissen und aus wettbewerbsrechtlichen Gründen vertraulich behandelt und nicht veröffentlicht.

Erhebungsbogen Aufbereiter und Verwerter von Aluminium

- ▶ Rücklaufquote „Aufbereitungsanlagen“ und „Verwertungsanlagen“: im In- und Ausland: 41 % (8/18); im Inland: 44 % (7/17)
- ▶ Gesamtzuführungsmenge der Aufbereiter und Verwerter, die Erhebungsbögen zurücksendeten, aus MSN 2021: ca. 70.600 t; entspricht 87 % der Gesamtmenge aller Aluminiumaufbereiter und -verwerter i. H. v. ca. 81.600 t (Datenübermittlung ZSVR an UBA am 24.11.2022; Mengen gerundet auf 100 t/a)

3.8.2 Pfadbeschreibung

Im Verpackungsbereich zählt zu den NE-Metallen hauptsächlich Aluminium. Abbildung 27 zeigt die Pfadbeschreibung für die Sortierung und Verwertung von Verpackungen aus Aluminium sowie von Aluminiumverbunden und aluminiumfolienhaltigen Verbunden. Die Grundlage für die Pfadbeschreibung und den Text dieses Abschnitts bilden die aktuelle erstmalige Befragung der Aluminiumaufbereiter und -verwerter für den vorliegenden Teilbericht 2 sowie die Publikationen UBA-TEXTE 11/2021 (Dehoust et al., 2021), „Aluminiumrecycling“ (Krone, 2000, Kapitel 6) und der Anforderungs- und Bewertungskatalog von cyclos-HTP in der Version 5.1 (Institut cyclos-HTP GmbH, 2022).

Die Unterschiede bei den LVP-Sortieranlagen liegen in den unterschiedlichen Ausführungen der Feinkornabsiebung. In der Aluminiumfraktion können sowohl Dosen (Getränke- und Aerosoldosen), Schalen, Tuben, Kaffeekapseln und Verschlüsse aus Aluminium, Aluminiumverbunden sowie aluminiumfolienhaltige Verbundverpackungen enthalten sein (Dehoust et al., 2021; Institut cyclos-HTP GmbH, 2022; Reissner, 2021). Als Inputmaterial gaben

¹⁷ Die Klassifizierung von Anlagen in Kontoklassen wird gemäß der ZSVR von Sachverständigen im Rahmen der Erstellung von Anlagenzertifikaten vorgenommen und anschließend von Beteiligten im Softwareprogramm wme.fact erfasst. Die Systembetreiber liefern der ZSVR jährlich im Rahmen der MSN Unterlagen, die die Einstufungen der Kontoklassen beinhalten.

die Aluminiumaufbereiter und -verwerter hauptsächlich die Fraktion 420 sowie die Aluminiumfraktion aus der Glasaufbereitung an.

Ausnahmen sind gemäß des Mindeststandards 2022 Becher mit Aluminiumplatinen sowie metallisierte Verpackungen (ZSVR, 2022), z. B. Beutel für Chips. Verpackungen mit Metallisierung seien gemäß Dehoust et al. „keine aluminiumhaltigen Verpackungen i. S. d. prozesstechnischen Abgrenzung“ (Dehoust et al., 2021, S. 158).

Bei der Verwertung von Aluminiumverpackungen gibt es insbesondere zwei kritische Punkte zu beachten: (1) die für den Korrosionsschutz zuständige durchsichtige Oxidschicht auf Aluminiumoberflächen führt im Schmelzverfahren zu Metallverlust und (2) die Kombination aus organischen Restinhalten und geringen Materialdicken führen in der Schmelze zur Oxidation des Aluminiums und damit wiederum zu Metallverlust (Dehoust et al., 2021; Martens & Goldmann, 2016).

In LVP-Sortieranlagen wird Aluminium über Wirbelstromabscheidung aufgrund der elektrischen Leitfähigkeit abgetrennt und als Fraktion in Ballen bereitgestellt. Hierbei werden auch Verbundverpackungen mit Aluminium aussortiert. Unterschiede liegen insbesondere in der Feinkornabsiebung. Es werden drei verschiedene Sortierprozessvarianten unterschieden. Es gibt LVP-Sortieranlagen, die Aluminiumverpackungen/-Verbunde bei einer Maschenweite von ≤ 20 mm absieben (S2) sowie Anlagen, die bei 30 mm – 60 mm absieben (S3). Bei diesen beiden Varianten wird der Sortierrest keiner Wirbelstromabscheidung unterzogen. Anlagen, die auch den Sortierrest noch einer Wirbelstromabscheidung unterziehen werden der Sortierprozessvariante S1 zugeordnet.

Es existieren zwei verschiedene Verwertungsprozessvarianten (Bulach et al., 2022; Dehoust et al., 2021; Krone, 2000):

- Direkte Pyrolyse (V1): Die Aluminiumfraktion wird heute mehrheitlich pyrolytisch aufbereitet. In den Pyrolyseanlagen wird die Aluminium-Fraktion zunächst mechanisch aufbereitet. Eine Kompaktierung (Verpressung) sorgt für eine Minimierung von Abbrandverlusten. Das Material wird in einen Shredder zerkleinert und einer Magnetabscheidung, Wirbelstromabscheidung und Windsichtung unterzogen. In der anschließenden Pyrolyse werden die organischen Anhaftungen, wie z. B. Lacke, Etiketten, Beschichtungen oder Lebensmittelreste verschwelt und in Pyrolysegas und Pyrolysekoks umgewandelt (GDA, 2017). Die Pyrolyse findet bei 450 °C – 500 °C (GDA, 2017) statt und wird unter Ausschluss von Sauerstoff durchgeführt. Das Pyrolysegas kann thermisch verbrannt werden und als Energiequelle verwendet werden (Bulach et al., 2022). In einer Nachsortierung werden NE-Metalle separiert. Das Endprodukt sind Aluminium-Konzentrate, die in einer Schmelze umgeschmolzen und anschließend als Aluminium-Rezyklat bereitgestellt werden können (Dehoust et al., 2021; Martens & Goldmann, 2016).
- Mechanische Aufbereitung (V2): Mechanische Verfahren stellen eine alternative Verwertungsoption dar. Der Prozess beginnt mit einem mechanischen Aufschluss durch Zerkleinerer. Es erfolgt eine Auftrennung in drei verschiedene Ströme: ein Aluminiumkonzentrat, ein Strom aus Aluminiumverbunden („Mittelgut“) sowie ein Rejekt, das als Ersatzbrennstoff (EBS) in ein Zementwerk gegeben werden kann. Das Mittelgut kann gemäß Dehoust et al. (2021) anschließend an Pyrolyseanlagen geliefert und dort umgeschmolzen werden. Es kann aber auch ein mechanischer Feinaufschluss durchgeführt werden, in dem Aluminium aus Schichtverbunden herausgelöst werden kann (Dehoust et al., 2021).

Nur vereinzelt gaben Anlagen an, eine Vorsortierung auf grobe Metallteile durchzuführen, welche Maschinen beschädigen könnten.

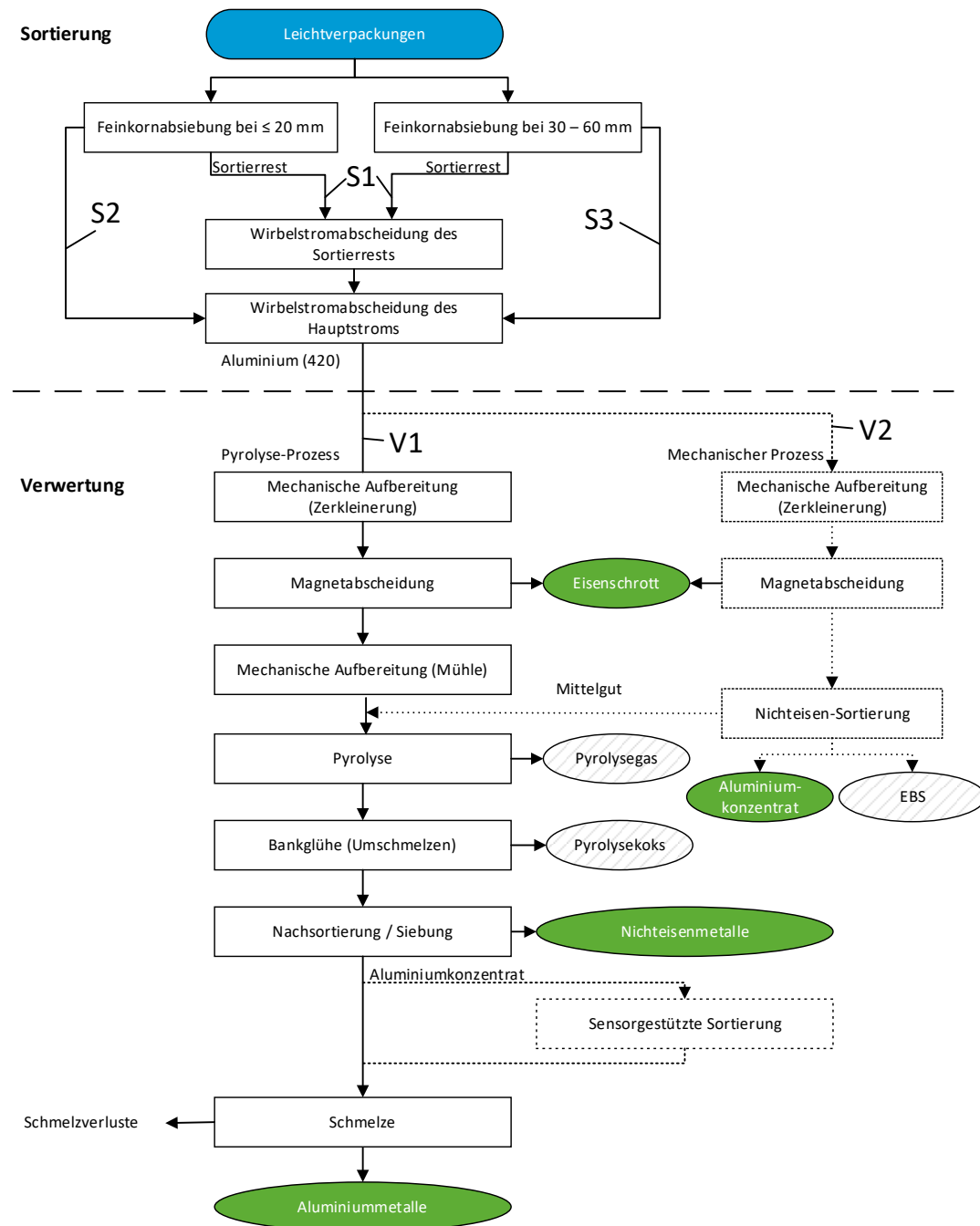
Moderne Sensortechniken, wie z. B. Röntgentechnologien (Röntgenfluoreszenzspektroskopie – XRF oder Röntgentransmissionsanalyse – XRT) oder die Lasertechnologie LIBS (Laserinduzierte Plasmaspektroskopie, engl. Laser-Induced Breakdown Spectroscopy,) können Metalle anhand der verschiedenen Legierungselemente unterscheiden. Mittels LIBS können Verpackungen nach Legierungsgruppen sortiert werden (z. B. 1xxx oder 3xxx). Über Röntgentechnologien können z. B. Buntmetalle aus der Aluminiumfraktion separiert werden (Raatz et al., 2022). Aus der Erhebung ist bekannt, dass LIBS und XRF bereits für Aluminiumverpackungen im Einsatz sind. Dies ist auch aus verschiedenen öffentlichen Quellen bekannt (Miroslavljevic, 2021; PreZero Pyral, o. J.; Reissner, 2021; Seifert, 2019). Aus wettbewerbsrechtlichen Gründen kann für diese Verwertungsvariante kein Anwendungsgrad angegeben werden.

In welchem Umfang die genannten Methoden im Einsatz sind, ist nicht bekannt. Im Austausch mit einem Experten wurden die genannten Verfahren als Stand der Technik eingestuft (Gespräch mit Hr. Dr. Christiani am 22.03.2023). Für eine detaillierte Beschreibung der Verfahrensweise sowie der Vor- und Nachteile der verschiedenen Methoden zur Metallanalytik XRF, XRT und LIBS wird an dieser Stelle auf UBA-TEXTE 81/2022 verwiesen (Raatz et al., 2022).

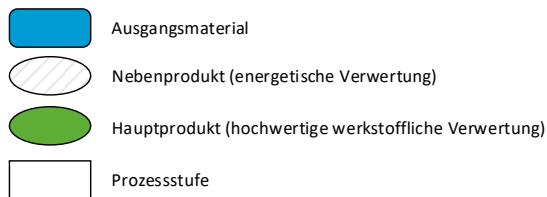
Die Aluminiumaufbereiter und -verwerter wurden zudem befragt, ab welcher Dicke eine Aluminiumschicht einer Verpackung recyclingfähig ist. Die Antworten (schriftlich als auch mündlich) schwanken dabei zwischen 7 µm bis 150 µm.

FKN mit Aluminiumanteil werden i. d. R. von den LVP-Sortieranlagen nicht in die Aluminiumfraktion, sondern über NIR-Trenner in die FKN-Fraktion sortiert und als Monofraktion bereitgestellt. Die Verwertung der FKN-Fraktion ist in Abschnitt 3.9 erläutert.

Abbildung 27: Schematische Darstellung der Pfadbeschreibung für die Sortierung und Verwertung von Verpackungen aus Aluminium und Aluminiumverbunden



Legende und Erläuterung



..... Geringe Mengenrelevanz der Zweigwahrscheinlichkeiten

Quelle: eigene aktualisierte Darstellung nach Grummt (2022), Umweltbundesamt, auf Grundlage von Dehoust et al. (2021), Tschachtli et al (2019) und Bulach et al. (2022)

3.8.3 Ermittlung der Praxis der SuV für Aluminium und Aluminiumverbunden

Aus den Verarbeitungsmengen der LVP-Sortierer für 2022 kann $P(A_S)$ für Verpackungen aus Aluminium berechnet werden. Da alle LVP-Sortieranlagen die Aluminiumfraktion sortieren und für ein Recycling bereitstellen, beträgt $P(A_S) = 100\%$. Aus den Verwertungszuführungsmengen aus dem MSN 2021 der Aluminiumaufbereiter und -verwerter kann $P(A_V)$ berechnet werden. Nach Definition des Mindeststandards 2022 werden alle Anlagen als Referenzanlagen eingestuft, demnach beträgt $P(A_V)$ ebenso 100% . Aus einer Multiplikation von $P(A_S)$ mit $P(A_V)$ ergibt sich $P(A_{SuV}) = 100\%$. Die Verteilung der Mengen ist in Abbildung 28 dargestellt.

Es kann zwischen sechs verschiedenen Pfadwahrscheinlichkeiten unterschieden werden, diese sind $P(S1,V1)$, $P(S1,V2)$, $P(S2,V1)$, $P(S2,V2)$, $P(S3,V1)$ und $P(S3,V2)$.

Bei der Variante S1 wird zusätzlich der Sortierrest einer Wirbelstromabscheidung unterzogen. Bei Variante S2 findet eine Feinkornabsiebung bei ≤ 20 mm statt und der Sortierrest durchläuft keine Wirbelstromabscheidung. Bei Variante S3 findet eine Feinkornabsiebung bei 30 mm – 60 mm statt und der Sortierrest durchläuft ebenso keine Wirbelstromabscheidung (Dehoust et al., 2021).

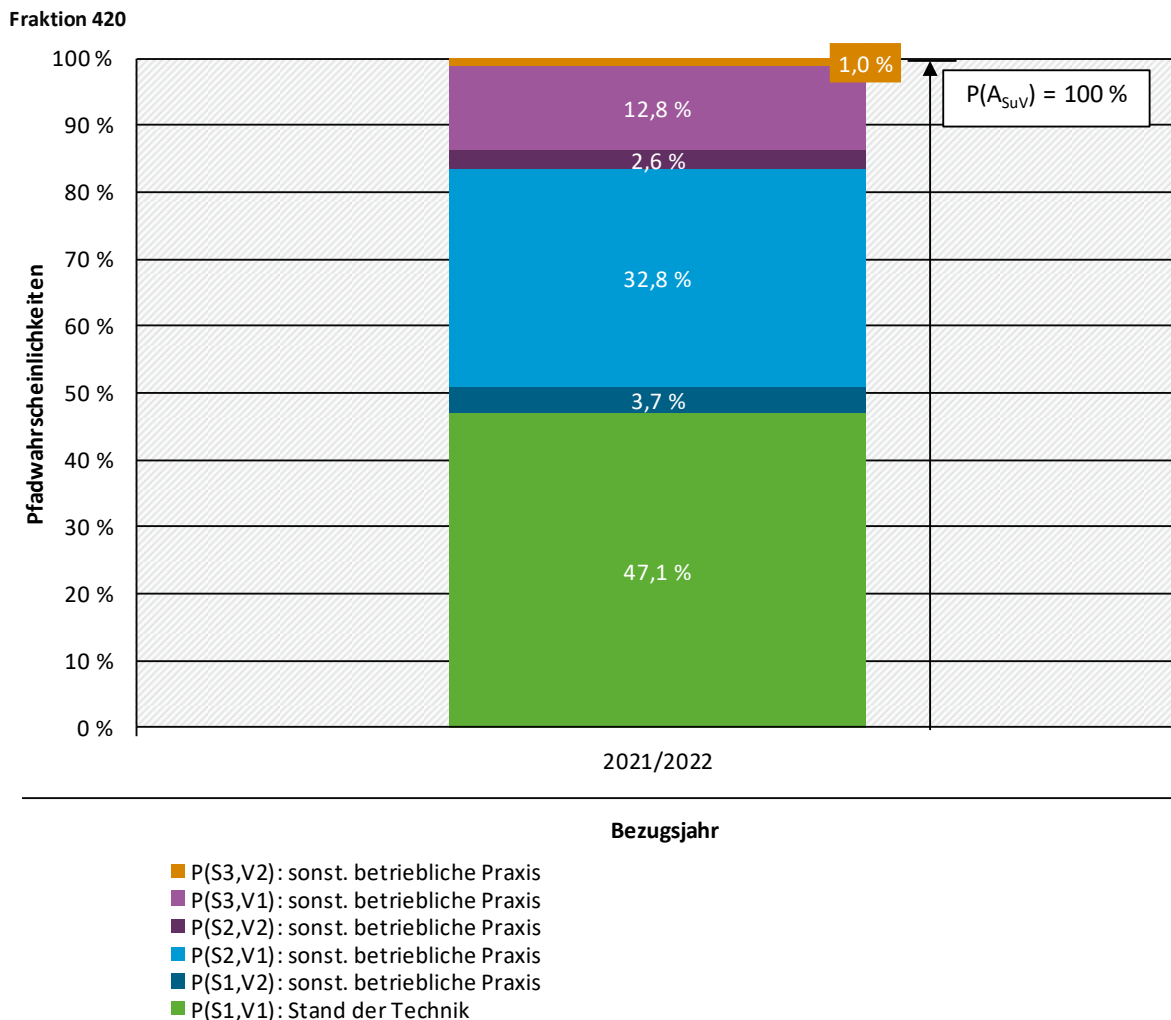
Alle Wahrscheinlichkeiten mit V1 umfassen die Verwertungsprozessvarianten, bei der die Aluminiumverpackungen direkt einer Pyrolyse zugeführt werden. Die Wahrscheinlichkeiten mit V2 umfassen die Verwertungsprozessvarianten, bei denen die Aluminiumfraktion in einer Aufbereitungsanlage mechanisch aufbereitet wird.

Im MSN 2021 wurden rund 80% der Gesamt-Verwertungszuführungsmenge der Fraktion 420 über Verwertungsanlagen zugeführt. Der Wert stimmt mit der Aussagen der Literatur für 2020 überein (Bulach et al., 2022; Mayer et al., 2022). Bei Betrachtung allein der Anlagen, die einen Fragebogen zurücksendeten, beläuft sich dieser Wert $P(V1)$ auf 93% .

Im MSN 2021 wurden rund 20% der Gesamt-Verwertungszuführungsmenge der Fraktion 420 zunächst Aufbereitungsanlagen zugeführt. Bei Betrachtung allein der Anlagen, die einen Fragebogen zurückgesendet haben, beläuft sich dieser Wert $P(V2)$ auf 7% .

Wir deklarieren die Wahrscheinlichkeit $P(S1,V1)$ mit $47,1\%$ als Stand der Technik, da bei dieser Varianten sowohl der Sortierrest als auch der Hauptverpackungsstrom einer Wirbelstromabscheidung unterzogen wird und im Verwertungsprozess eine Pyrolyse stattfindet.

Abbildung 28: Praxis der SuV für 2021/2022 für Verpackungen aus Aluminium und Aluminiumverbunden



Quelle: eigene Darstellung, Umweltbundesamt, auf methodischer Grundlage von Dehoust et al. (2021)

3.8.4 Rezyklatanwendungen

Anlagen, die unter der Kontoklasse „Verwertungsanlagen“ (Datenübermittlung ZSVR an UBA am 24.11.2022; Erläuterung unter 3.8.1) gebucht wurden, gaben sowohl Guss- als auch Knetlegierungen sowie Eisenschrott als Endprodukte an. Die folgenden Rezyklatanwendungen wurden seitens der Verwertungsanlagen genannt:

- ▶ Aluminium-Grieß und -Granulat, z. B. als Einsatzmaterial für Sekundärschmelzwerke zur Produktion von Aluminiumgusslegierungen und z. B. als exothermes Aufheizmittel und Antilunkerpulver als Gießereihilfsmittel,
- ▶ Automobilindustrie,
- ▶ Verpackungen (z. B. Dosen),
- ▶ Feuerwerkskörper.

Gusslegierungen sind Aluminiumlegierungen, die insbesondere für die Herstellung von Formgussteilen entwickelt wurden. Sie zeichnen sich durch ihre guten Gießeigenschaften aus und enthalten hauptsächlich Silizium, Magnesium und Kupfer als Hauptlegierungselemente. Knetlegierungen sind Legierungen, die für die weitere Verarbeitung durch plastische Umformung wie Walzen, Schmieden oder Pressen bestimmt sind. Diese Legierungen enthalten in erster Linie Mangan, Silizium, Magnesium, Zink und Kupfer als Hauptlegierungselemente (Krone, 2000). Aluminiumverpackungen können aus verschiedenen Legierungstypen hergestellt werden. Geträndek Dosen besitzen beispielsweise typischerweise den Knetlegierungstyp 3004, wobei der Öffnungsclip i. d. R. aus der Legierung 5182 besteht. Aluminiumtuben besitzen i. d. R. einen Legierungstyp aus der 1000-Serie. Werden die Legierungstypen im Recyclingprozess voneinander getrennt, kann dies die Qualität des Rezyklats verbessern (Gürlich et al., 2022; Krone, 2000; Raatz et al., 2022).

Anlagen, die unter der Kontoklasse „Aufbereitungsanlagen“ (Datenübermittlung ZSVR an UBA am 24.11.2022; Erläuterung unter 3.8.1) gebucht wurden, gaben sowohl Guss-, als auch Knetlegierungen sowie Eisenschrott als Endprodukte an. Die folgenden Rezyklatanwendungen wurden seitens der Verwertungsanlagen genannt:

- ▶ Gießereihilfsmittel,
- ▶ Desoxidationsmittel (Exothermie),
- ▶ Strahlmittel,
- ▶ Friedel-Crafts Katalysator.

Alle genannten Rezyklatanwendungen werden nach dem Austausch mit einem externen Experten (Gespräch mit Hr. Dr. Christiani am 22.03.2023) gemäß Mindeststandard 2022 als hochwertig werkstofflich eingestuft, da i. S. d. Mindeststandards Neuware in werkstofftypischen Anwendungen ersetzt wird.

3.8.5 Einstufung problematischer Verpackungsmerkmale bei der Aufbereitung und Verwertung

Die Erhebung bot den Aluminiumaufbereitern und -verwertern die Möglichkeit, eine Einschätzung zur Relevanz problematischer Verpackungsmerkmale zu geben, welche spezifische Probleme im Verwertungsprozess verursachen können. Die dazugehörigen Ergebnisse sind in Tabelle 11 dargestellt. Als Basis dafür dienten die Angaben in der Negativliste des geleakten Entwurfs der EU-Verpackungsverordnung (European Commission, 2022b; Riebling, 2022, S. 25), eine Design-for-Recycling-Guideline (Gürlich et al., 2022) sowie der Austausch mit einem Experten im UBA. Des Weiteren konnten von den Verwertern zusätzliche Angaben (gelistet unter „Weitere Angaben“) zu problematischen Verpackungsmerkmalen gemacht werden. Diese konnten ebenso von den Aufbereitern und Verwertern hinsichtlich ihrer Relevanz eingeschätzt werden.

Tabelle 11: Einschätzung der Aluminiemaufbereiter und -verwerter zu problematischen Verpackungsmerkmalen (Gesamtanzahl an Referenzanlagen: 8)

Problematische Verpackungsmerkmale	Problem unbekannt	kein Problem	Problem nicht gelöst, aber aufgrund geringer Mengenrelevanz bedeutungslos	Problem bekannt, technisch		keine Angabe
				weitgehend gelöst	nicht gelöst	
Geringe Materialstärken	0	4	0	1	3	0
Komponenten aus Blei (durch Fehlwürfe)	1	2	4	0	1	0
Komponenten aus anderen Aluminiumlegierungen als üblich	4	4	0	0	0	0
Druckfarben	3	2	2		1	
Komponenten aus PVC	1	0	4	3	0	0
Aerosoldosen mit kohlenwasserstoffbasiertem Treibmittel oder anderen Restinhalten	1	5	0	1	1	0
Dickwandige Gasdruckflaschen oder -kartuschen	1	5	0	1	1	0
Sonstige Verpackungen mit konstruktionsbedingtem Restinhalt	2	5	1	0	0	0
Verbundverpackungen	1	3	2	2	0	0
Weitere Angaben:						
<i>Lithium-Ionen-Batterien (extreme Brandgefahr bei der Zerkleinerung)</i>					1	

Quelle: Tabelle basierend auf der aktuellen Erhebung

Es ist festzustellen, dass viele der Angaben überwiegend von den Aufbereitern und Verwertern als „Problem unbekannt“, „kein Problem“ oder „aufgrund geringer Mengenrelevanz bedeutungslos“ eingestuft wurden. Außer dem Verpackungsmerkmal „geringe Materialstärken“ stufte jeweils nur ein Anlagenbetreiber die genannten Aspekte als „nicht gelöst ein“.

Zum Aspekt „Aerosoldosen“ schrieb ein Anlagenbetreiber, dass nicht vollständig entleerte Dosen beim Zerkleinern zu Verpuffungen führen könnten. Ein anderer Anlagenbetreiber gab mündlich an, dass nicht restentleerte Dosen kleine Flammen im Pressvorgang bilden könnten. Insbesondere die Kohlenwasserstoff-basierten Treibmittel stellen eine Brandgefahr im Recyclingprozess dar, zudem seien leicht entflammbare Flüssigkeiten kritisch (Gürlich et al., 2022). Der Mindeststandard kann keinen Einfluss auf die Restentleerung durch die Verbraucher*innen nehmen. Es besteht demnach vorerst im Mindeststandard kein Handlungsbedarf.

Ein Anlagenbetreiber gab an, dass „Komponenten aus PVC“ nur in geringen Mengen in der Aluminiumfraktion vorhanden seien, aber zur Korrosion in der Pyrolyse führen könnten. Aufgrund der geringen Mengenrelevanz würden diese Verpackungen keine Recyclingunverträglichkeit darstellen. PVC würde nach mündlicher Aussage eines Verwerter insbesondere bei Blisterverpackungen für Medikamente als Formfolie eingesetzt werden, wobei Aluminium als Deckfolie Anwendung findet.

Blei ist gemäß zweier Anlagenbetreiber problematisch im Recyclingprozess, aber nicht in Verpackungen enthalten. Es handle sich demnach um Fehlwürfe.

Zum Aspekt „Druckfarben“ gaben zwei Anlagenbetreiber an, dass diese bei der Pyrolyse verschwelen würden.

Die zusätzliche Angabe „Lithium-Ionen-Batterien“ nehmen auf einen Fehlwurf Bezug. Da Fehlwürfe nicht im Mindeststandard behandelt werden können, besteht im Mindeststandard diesbezüglich vorerst kein Handlungsbedarf.

Wir empfehlen vorerst keine der genannten Aspekte mit in den Mindeststandard aufzunehmen.

3.9 Verwertung von FKN

3.9.1 Rücklauf der Erhebung

An insgesamt 12 Verwerter von FKN im In- und Ausland wurden Erhebungsbögen in zwei Erhebungen versendet. Für die Anlagen, die keinen Fragebogen zurücksendeten, konnte anhand der Letztempfängerzertifikate eine Aussage zur Hochwertigkeit der dort angegebenen Endprodukte getroffen werden. Die Rücklaufquoten inkl. der Klassifizierung über Letztempfängerzertifikate liegen im In- und Ausland bei 92 % und in Deutschland bei 86 %.

Die Gesamtzuführungsmenge der in den MSN 2021 aufgeführten Verwertungsanlagen, die einen Erhebungsbogen zurücksendeten plus der Anlagen, bei denen die Klassifizierung über Letztempfängerzertifikate erfolgte, liegt für FKN in 2021 bei 137.100 t (gerundet auf 100 t/a). Damit wurden 99,9 % der Gesamtzuführungsmenge aller Verwerter von FKN aus dem MSN 2021 abgedeckt. Dieser abgedeckte Mengenanteil liegt über 70 % der Gesamtzuführungsmenge und wird damit als repräsentativ angesehen.

Berücksichtigt wurden ausschließlich Letztempfängeranlagen und die Fraktionen 510 („Flüssigkeitskartons“) und 512 („Flüssigkeitskartons/Getränkekartons“) (Der Grüne Punkt - Duales System Deutschland GmbH, 2020; 2023a).

Die Angaben der einzelnen Anlagen werden zum Schutz von Betriebs- und Geschäftsgeheimnissen und aus wettbewerbsrechtlichen Gründen vertraulich behandelt und nicht veröffentlicht.

Erhebungsbogen FKN-Verwerter

- ▶ Rücklaufquote (inkl. Klassifizierung über Letztempfängerzertifikate): im In- und Ausland: 92 % (11/12); im Inland: 86 % (6/7)
- ▶ Gesamtzuführungsmenge der Verwerter, die Erhebungsbögen zurücksendeten (inkl. Klassifizierung über Letztempfängerzertifikate) aus MSN 2021: ca. 137.100 t; entspricht 99,9 % der Gesamtmenge aller FKN-Verwerter i. H. v. ca. 137.200 t (Datenübermittlung ZSVR an UBA am 24.11.2022; Mengen gerundet auf 100 t/a)

3.9.2 Pfadbeschreibung

Abbildung 29 zeigt die Pfadbeschreibung für die Sortierung und Verwertung von FKN. Als Grundlage der Erläuterung und der Reihenfolge der Prozesse dienten die beiden Erhebungen zur Ermittlung der Praxis der SuV, die Publikation UBA-TEXTE 11/2021 (Dehoust et al., 2021) sowie der Anforderungs- und Bewertungskatalog von cyclos-HTP in der Version 5.1 (Institut cyclos-HTP GmbH, 2022).

FKN wird in LVP-Sortieranlagen über NIR-Trenner abgetrennt und für die Verwertungsanlagen als Großballen bereitgestellt. Wie bereits im Abschnitt 3.1.3 erwähnt, wurden FKN noch zu 0,2 % in 2022 manuell sortiert.

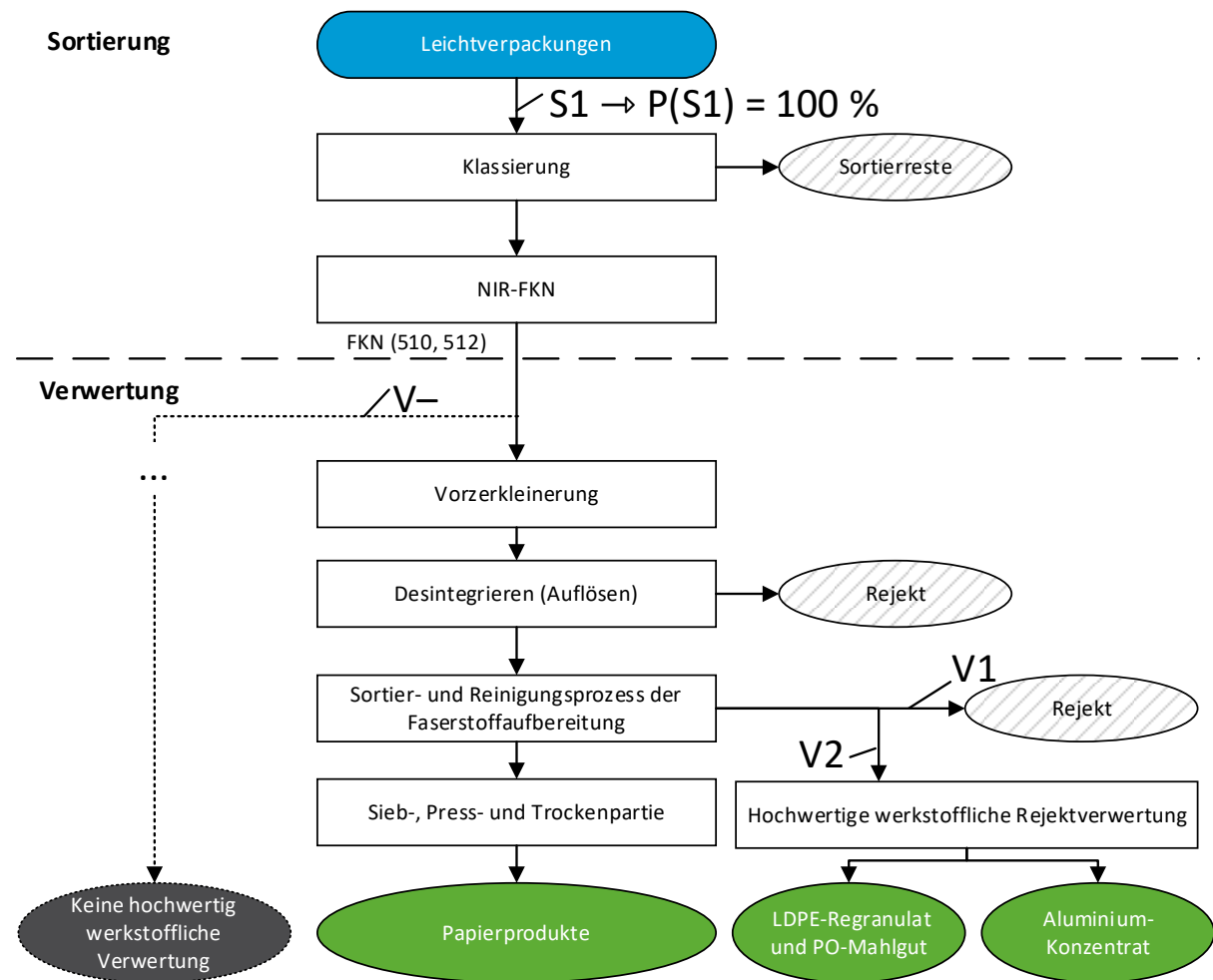
Der erste Schritt bei den Verwertern von FKN ist die Zerkleinerung der Verpackungen in 3-4 Teilstücke in einem Shredder. Durch die Schnittkanten werden die Papierfasern für das Wasser zugänglich (Martens & Goldmann, 2016). Anschließend wird das Papier befeuchtet, um die Fasern herauszulösen sowie die Wasserstoffbrückenbindungen aufzubrechen, sodass daraus eine pumpfähige Suspension resultiert (Blebschmidt, 2011). Dieser Prozess wird auch als Desintegrieren bezeichnet. Im Sprachgebrauch der PPK-Verwerter werden für diesen Schritt auch die Begriffe Auflösen und Zerfasern verwendet. Für FKN sind dafür überwiegend Auflösetrommeln im Einsatz, um die enthaltenen Kunststoff- und Aluminiumfolien nicht zu stark zu zerkleinern. Dies erleichtert deren spätere Abtrennung. Mit der primären Desintegration wird auch noch eine andere Funktion erfüllt: unerwünschte papierfremde Bestandteile, wie beispielsweise Kunststofffolien, Textilien, Drähte und Kleberückstände werden abgelöst. In diesem Schritt werden auch die Kunststoffanteile (Deckel, LDPE-Folie und andere Kunststoffkomponenten) und Aluminiumfolie ausgetragen.

In mehreren Aufbereitungsstufen (Reinigung und Sortierung) des Faserstoffs werden weitere Kunststoff- und Aluminiumanteile als Rejekt ausgeschleust. Anschließend folgt die Sieb-, Press- und Trockenpartie der Papiermaschine auf der das finale Papierprodukt (z. B. Wellpappenrohpaper) hergestellt wird.

Das Rejekt kann anschließend in einem Zementwerk beigemischt bzw. energetisch verwertet werden (V1) oder werkstofflich verwertet werden. Die Verwertungsvariante, bei der eine hochwertige werkstoffliche Rejektverwertung stattfindet, wurde als Pfad (V2) abgebildet (erstmalig nicht ausgegraut). Diese Anlage wurde einzeln befragt. Bei dieser Variante sollen das durch die Rejektaufbereitung gewonnene LDPE-Regranulat, das PO-Mahlgut sowie das Aluminiumkonzentrat verwertet werden (Palurec GmbH, o. J.). Die Anlage ist im Jahr 2021 in Betrieb gegangen (bvse, 2021; EUWID, 2021). Für das PO-Mahlgut aus den PE- und PP-Verschlüssen sowie für das LDPE-Regranulat wurde eine hochwertige werkstoffliche Verwertung bereits im Anforderungs- und Bewertungskatalogs des Institutes cyclos-HTP von 2022 als nachgewiesen angesehen (Institut cyclos-HTP GmbH, 2022). Für eine detaillierte Beschreibung des Recyclingprozesses wird auf die Website der Palurec (Palurec GmbH, o. J.) verwiesen.

Aus öffentlichen Quellen ist bekannt, dass Kapazitäten für ein anderes Recyclingverfahren für FKN-Rejekte aufgebaut werden. Die FKN-Rejekte sollen dort mit einer speziellen Trennflüssigkeit voneinander getrennt und recycelt werden (FKN, 2022). Diese Art von Recyclingverfahren ist allerdings noch nicht im industriellen Maßstab vorhanden und kann deshalb noch nicht in die aktuelle Praxis der Sortierung und Verwertung einbezogen werden (E-Mail von Hr. Hornung am 09.06.2023). Wir behalten uns vor, den Aufbau der Kapazitäten weiter zu beobachten.

Abbildung 29: Schematische Darstellung der Pfadbeschreibung für die Sortierung und Verwertung von FKN



Legende und Erläuterung

- Ausgangsmaterial
- Nebenprodukt (energetische Verwertung)
- Wahrscheinlichkeiten der Varianten werden nicht in die Anwendungsgrade einberechnet
- Hauptprodukt (hochwertige werkstoffliche Verwertung)
- Prozessstufe
- Geringe Mengenrelevanz der Zweigwahrscheinlichkeiten

Quelle: eigene aktualisierte Darstellung nach Grummt (2022), Umweltbundesamt, auf Grundlage von Dehoust et al. (2021)

3.9.3 Ermittlung der Praxis der SuV für FKN

Aus den Verarbeitungsmengen der LVP-Sortierer für 2022, als auch aus den Verwertungszuführungsmengen aus dem MSN 2021, kann $P(A_{SuV})$ für FKN berechnet werden. Die Papierfabrik Delkeskamp, welche auch die FKN-Fractionen 510 und 512 verarbeitete, wurde im Spätsommer 2022 geschlossen und die Anlage verkauft (Delkeskamp, 2022; EUWID

Verpackung, 2023). Würden die Mengen, die bisher zu Delkeskamp gingen, als nicht hochwertig werkstofflich angesehen, würde $P(A_{SuV})$ bei 74,7 % liegen. ReCarton gab in einem Gespräch an, dass über den Jahreswechsel einige Tonnen FKN energetisch verwertet werden mussten, die Verwertungssicherheit für FKN aktuell aber bereits zu 100 % wieder gegeben sei. Die Mengen, die bisher zu Delkeskamp gingen, wurden nach dem Austausch mit ReCarton als hochwertig werkstofflich verwertet angesehen (E-Mail von ReCarton am 15.03.2023). Unter dieser Prämisse beträgt $P(A_{SuV})$ für die Bezugsjahre 2021/2022 für FKN 99,6 %. Die Verteilung auf die Pfade ist in Abbildung 30 für FKN dargestellt.

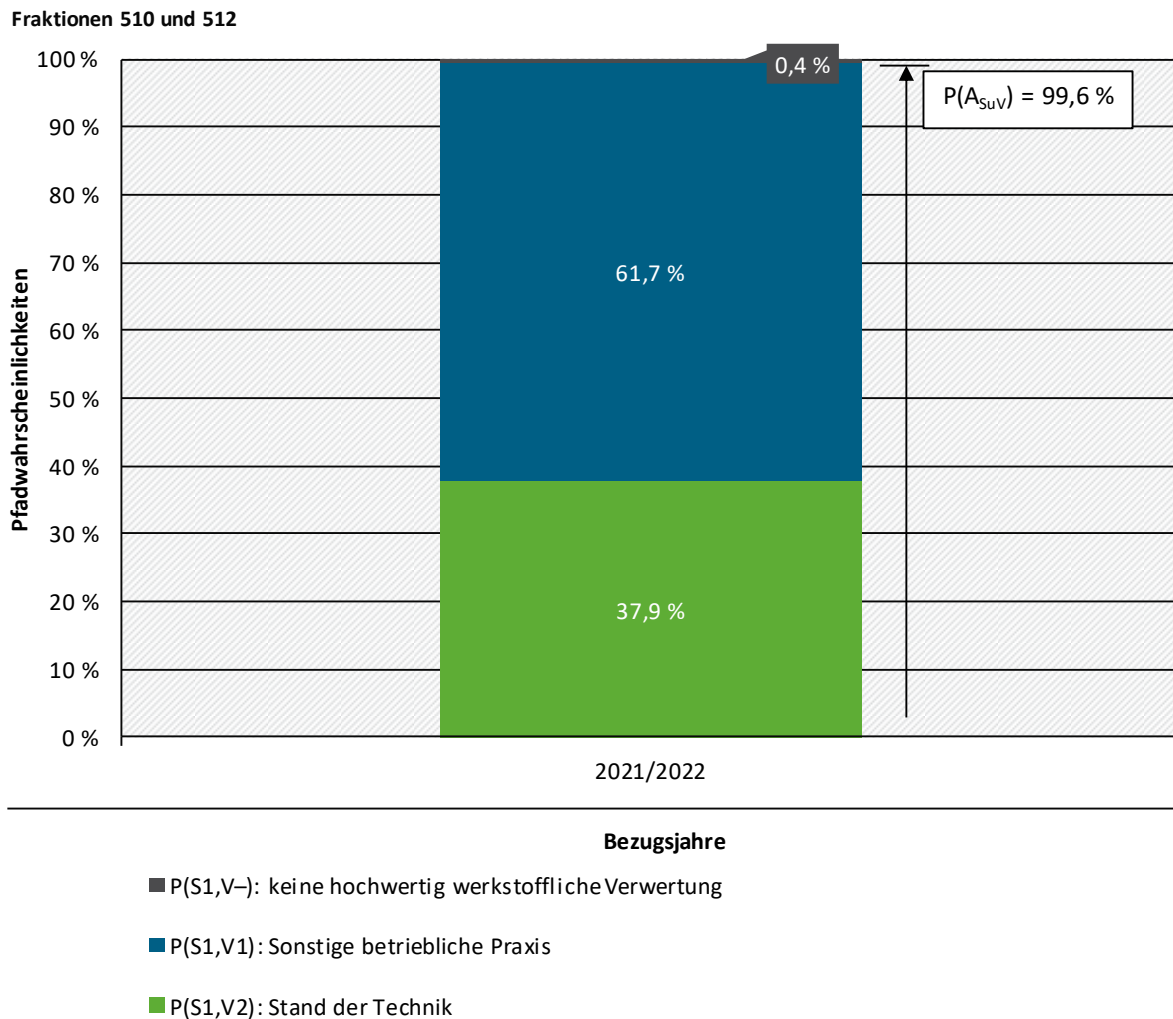
Die Pfadwahrscheinlichkeit $P(S1,V2)$ mit 37,9 % wird als Stand der Technik eingestuft. Bei dieser Variante wird FKN über NIR sortiert und anschließend mit hochwertiger Rejektverwertung hochwertig werkstofflich verwertet. Die Pfadwahrscheinlichkeit $P(S1,V1)$ beträgt 61,7 % und kann als sonstige betriebliche Praxis angesehen werden. Bei dieser Variante findet keine hochwertige werkstoffliche Rejektverwertung statt. Die Wahrscheinlichkeit, dass keine hochwertige werkstoffliche Verwertung stattfindet (Variante mit V–) beträgt 0,4 %.

Die angestrebte Jahreskapazität der bestehenden Palurec-Anlage von 18.000 Tonnen pro Jahr wäre ausreichend, um eine begrenzte Recycling-Infrastruktur der FKN-Rejekte zu bestätigen (Mindeststandard 2022, Anhang 1, Spalte 3B).

Einige Anlagen verwerten zur Verbesserung der Produktqualität weitere Inputqualitäten aus anderer Herkunft gemeinsam mit den Systemmengen, beispielsweise Systemmengen aus dem Ausland oder Produktionsabfälle (z. B. Stanz- und Schnittabfälle).

Weiterhin wurden die Verwerter nach der Stofflösezeit befragt. Die Zeit für die Desintegration der Fasern hängt maßgeblich von den eingesetzten Verpackungen, der Qualität der Verpackungen sowie dem verwendeten System (Pulper oder Auflösetrommel) ab. Bei der kommenden Totalerhebung ist geplant, das Stofflösesystem zur Ermittlung der Praxis der SuV mit abzufragen, soweit dies für Zwecke des Mindeststandards von Belang ist. Verwerter der Fraktion FKN gaben Stofflösezeiten zwischen 25 Minuten und 45 Minuten an. Als maximale Temperaturen bei der Stofflösung wurden für FKN Werte zwischen 35 °C und 60 °C genannt. Die Papiertrocknung findet bei Temperaturen zwischen 100 °C und 160 °C statt. Für FKN kann zusätzlich eine Dispergierung mit Hygienisierung stattfinden.

Abbildung 30: Praxis der SuV für 2021/2022 für FKN

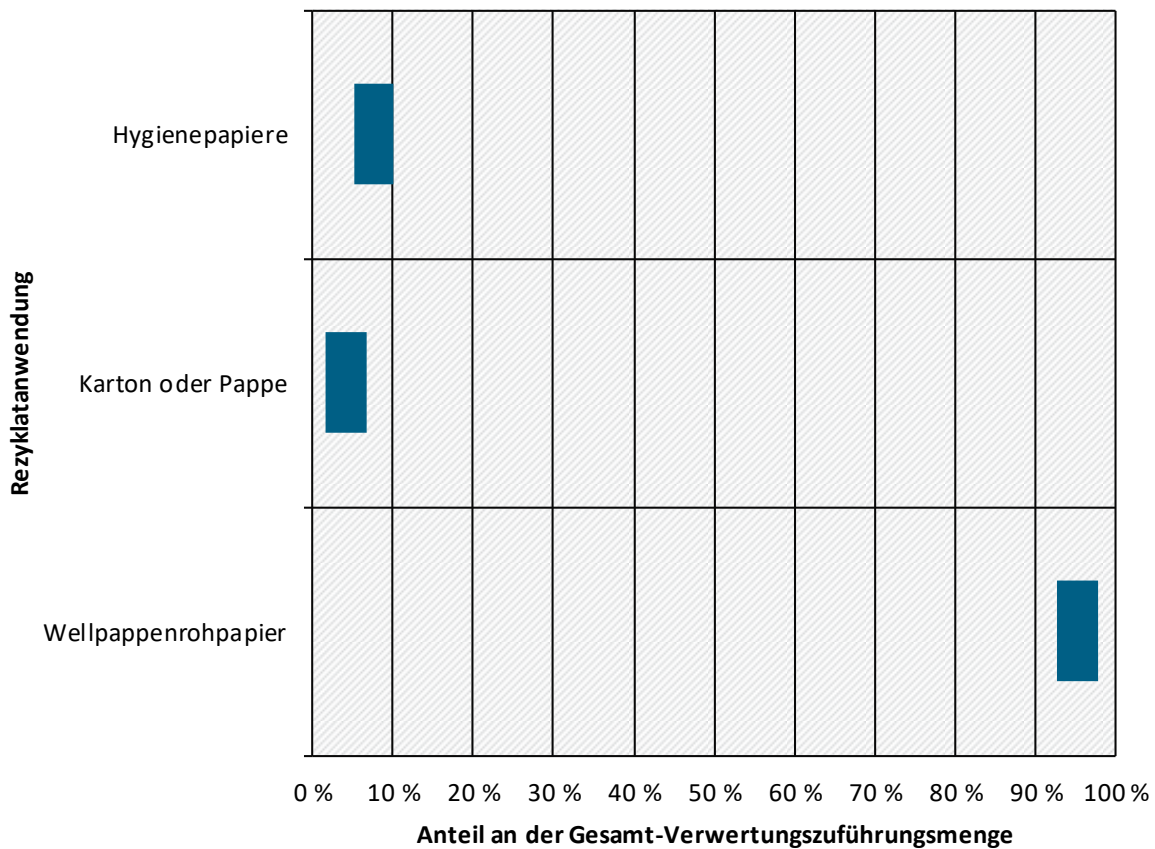


Quelle: eigene Darstellung, Umweltbundesamt, auf methodischer Grundlage von Dehoust et al. (2021)

3.9.4 Rezyklatanwendungen

Die Referenzanlagen gaben auf die Gesamtmenge bezogen überwiegend Wellpappenrohapiere als Rezyklatanwendung an. Teilweise werden auch Hygienepapiere und Karton hergestellt. In Abbildung 31 ist die Verteilung der Rezyklatanwendungen bezogen auf die Gesamt-Verwertungszuführungsmenge dargestellt. Voraussichtlich ergibt sich hierbei aufgrund der Schließung der Papierfabrik Delkeskamp eine leichte Verschiebung.

Abbildung 31: Rezyklatanwendungen der Referenzanlagen (Bezugsjahr 2021) für die Verwertung von FKN¹⁸



Quelle: eigene Darstellung, Umweltbundesamt

3.9.5 Einstufung problematischer Verpackungsmerkmale bei der Verwertung

Die Erhebung bot den Verwertern von FKN die Möglichkeit, eine Einschätzung zur Relevanz problematischer Verpackungsmerkmale zu geben, welche spezifische Probleme im Verwertungsprozess verursachen können. Die dazugehörigen Ergebnisse sind Tabelle 12 dargestellt. Als Basis dafür dienten die im Anhang 3 des Mindeststandards 2021 aufgeführte Recyclingunverträglichkeit „Nicht wasserlösliche oder nicht redispergierende Klebstoffapplikationen“ (ZSVR, 2021, S. 29). Zusätzlich wurde die Ausschlussliste der EuPIA abgefragt, um den Einfluss gefährlicher Bestandteile in Druckfarben abzuschätzen. Des Weiteren konnten zusätzliche Angaben (gelistet unter „Weitere Angaben“) zu problematischen Verpackungsmerkmalen gemacht werden. Diese konnten ebenso von den Verwertern hinsichtlich ihrer Relevanz eingeschätzt werden.

¹⁸ Aus wettbewerbsrechtlichen Gründen wurde die Spannweite geringfügig manipuliert.

Tabelle 12: Einschätzung der Verwerter von FKN zu problematischen Verpackungsmerkmalen (Gesamtanzahl an Referenzanlagen: 7)

Problematische Verpackungsmerkmale	Problem unbekannt	kein Problem	Problem bekannt, aber aufgrund geringer Mengenrelevanz bedeutungslos	Problem bekannt, technisch		keine Angabe
				weitgehend gelöst	nicht gelöst	
Nicht wasserlösliche oder nicht redispergierende Klebstoffapplikationen	0	0	1	2	2	2
Komponenten der EuPIA-Ausschlussliste	2	0	2	0	1	2
Weitere Angaben:						
<i>Steigende Kunststoffapplikationen / Anteil an Hartplastik nimmt zu</i>						2
<i>Schlechte Sortierung und ein hoher Anteil an Fremdstoffen, insbesondere andere papierbasierte Verbundverpackungen, erhöhen den Faseranteil im Rejekt; dies führt zu höheren Kosten und technischen Mehraufwendungen in nachgelagerten Prozessen</i>				1		

Quelle: Tabelle basierend auf Grummt (2022) und der aktuellen Erhebung, auf methodischer Grundlage von Dehoust et al. (2021)

Es ist festzustellen, dass die Angabe im Anhang 3 des Mindeststandards „Nicht wasserlösliche oder nicht redispergierende Klebstoffapplikationen“ überwiegend von den Verwertern bestätigt wird. Wir empfehlen diesen Punkt weiterhin beizubehalten.

Die zwei weiteren Angaben wurden bereits im Teilbericht 1 erläutert und in den EK III eingebracht.

3.9.6 Störstoffkomponenten im Rejekt

Die Verwerter von FKN mit Referenzanlagen wurden befragt, welche Störstoffkomponenten dem Rejekt zugeführt werden. Diese Abfrage wurde bereits von Dehoust et al. durchgeführt (Dehoust et al., 2021) sowie im Teilbericht 1 aufgeführt. In Tabelle 13 sind die Ergebnisse dieser Einschätzung dargestellt. Fast alle Referenzanlagen gaben dabei feinkörnige, mineralische Verunreinigungen wie Sand, Steine oder Glassplitter an. Kunststoffpartikel und Stippen (Faserbündel mit hohem Zerfaserungswiderstand) wurden von 5 Verwertern, Makrostickies und Streichfarben von 4 Verwertern und Füllstoffe von 3 Verwertern angegeben. Kurzfasern nannte kein FKN-Verwerter als Störstoff. Gelingt es nicht, die Störstoffe in das Rejekt auszutragen, können sie zu Bahnabrissen in der Papiermaschine oder Qualitätsproblemen im

Endprodukt führen. Je mehr Störstoffe vorhanden sind, desto geringer ist die Faserausbeute und desto höhere Entsorgungskosten können für die Verwerter entstehen.

Tabelle 13: Störstoffkomponenten im Rejekt nach Einschätzung der FKN-Verwerter (Gesamtanzahl an Referenzanlagen: 7)

Störstoffkomponente	Anzahl
Feinkörnige mineralische Verunreinigungen (Sand, Steine, Glassplitter)	6
Kunststoffpartikel	5
Makrostickies	4
Stippen	5
Kurzfasern	0
Füllstoffe	3
Streichfarben	4

Quelle: Tabelle basierend auf Grummt (2022) und der aktuellen Erhebung, auf methodischer Grundlage von Dehoust et al. (2021)

3.10 Verwertung von PPK aus LVP

3.10.1 Rücklauf der Erhebung

An insgesamt 18 Verwerter von PPK aus LVP im In- und Ausland wurden Erhebungsbögen in zwei Erhebungen versendet. Für die Anlagen, die keinen Fragebogen zurücksendeten, konnte anhand der Letztempfängerzertifikate eine Aussage zur Hochwertigkeit der dort angegebenen Endprodukte getroffen werden. Die Rücklaufquoten inkl. der Klassifizierung über Letztempfängerzertifikate liegen im In- und Ausland bei 89 % und in Deutschland bei 87 %.

Die Gesamtzuführungsmenge der Verwertungsanlagen, die einen Erhebungsbogen zurücksendeten plus der Anlagen, bei denen die Klassifizierung über Letztempfängerzertifikate erfolgte, liegt ausweislich des MSN 2021 für PPK aus LVP in 2021 bei ca. 108.900 t (gerundet auf 100 t/a; inkl. Delkeskamp). Damit wurden ca. 99,6 % der Gesamtzuführungsmenge aller Verwerter von PPK aus LVP aus dem MSN 2021 abgedeckt. Dieser abgedeckte Mengenanteil liegt über 70 % der Gesamtzuführungsmenge und wird damit als repräsentativ angesehen.

Berücksichtigt wurden ausschließlich Letztempfängeranlagen und die Fraktion 550 (PPK aus LVP).

Die Angaben der einzelnen Anlagen werden zum Schutz von Betriebs- und Geschäftsgeheimnissen und aus wettbewerbsrechtlichen Gründen vertraulich behandelt und nicht veröffentlicht.

Erhebungsbogen PPK aus LVP-Verwerter

- Rücklaufquote (inkl. Klassifizierung über Letztempfängerzertifikate; inkl. Delkeskamp): im In- und Ausland: 89 % (16/18); im Inland: 87 % (14/16)

- Gesamtzuführungsmenge der Verwerter, die Erhebungsbögen zurücksendeten, aus MSN 2021 (inkl. Klassifizierung über Letzttempfängerzertifikate; inkl. Delkeskamp): ca. 108.900 t; entspricht 99,6 % der Gesamtmenge aller PPK-Verwerter i. H. v. ca. 109.300 t (Datenübermittlung ZSVR an UBA am 24.11.2022; Mengen gerundet auf 100 t/a)

3.10.2 Pfadbeschreibung

Abbildung 32 zeigt die Pfadbeschreibung für die Sortierung und Verwertung von PPK aus LVP. Einbezogen wird die Fraktion 550. Als Grundlage der Erläuterung und der Reihenfolge der Prozesse dienen die beiden Erhebungen zur Ermittlung der Praxis der SuV, die Publikation UBA-TEXTE 11/2021 (Dehoust et al., 2021) sowie der Anforderungs- und Bewertungskatalog von cyclos-HTP in der Version 5.1 (Institut cyclos-HTP GmbH, 2022).

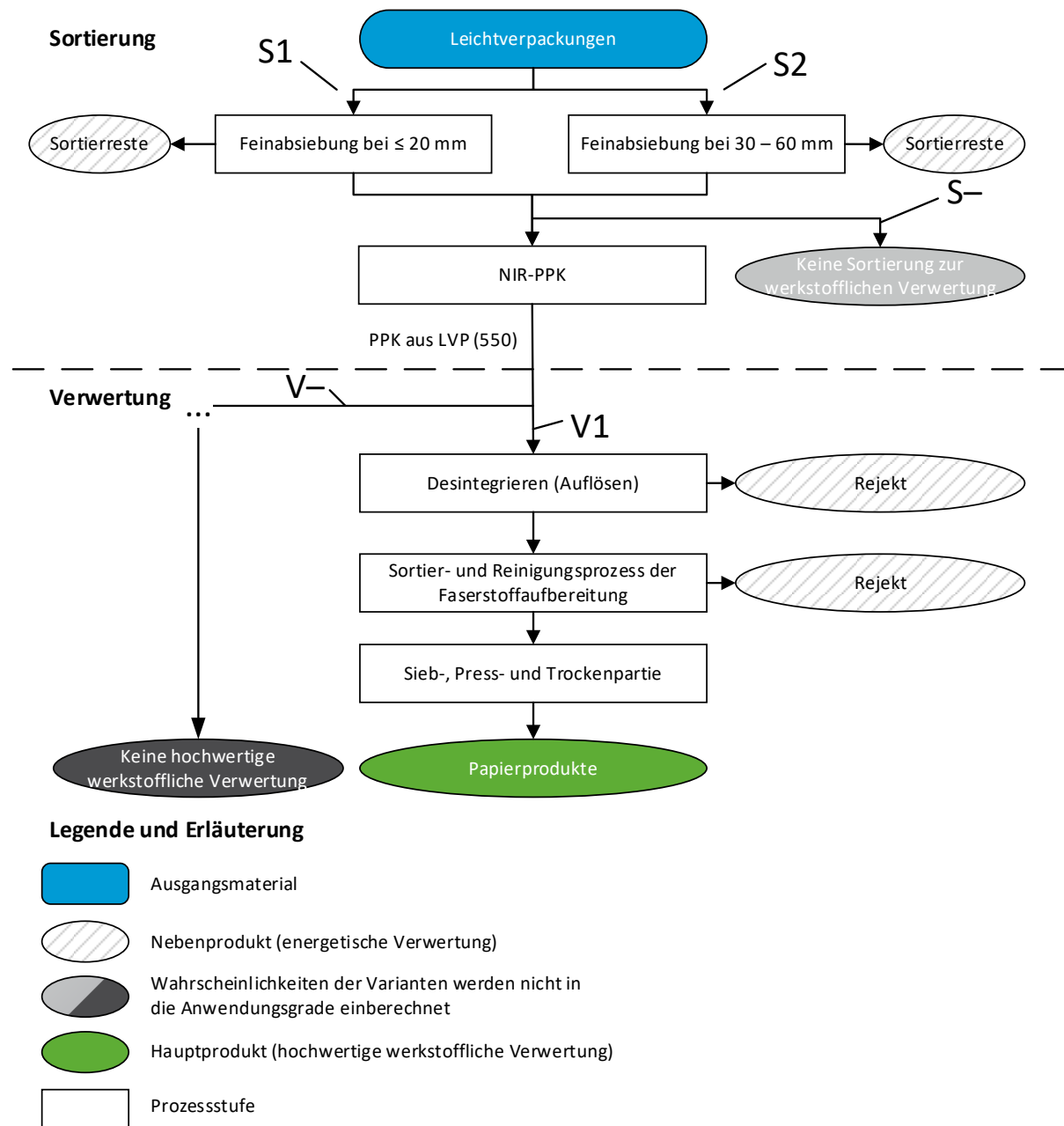
PPK aus LVP wird in LVP-Sortieranlagen über NIR-Trenner abgetrennt und für die Verwertungsanlagen als Großballen bereitgestellt. Wie bereits im Abschnitt 3.1.3 erwähnt, wurde PPK aus LVP noch zu 0,2 % in 2020 und 2021 in den LVP-Sortieranlagen manuell sortiert.

S1 (≤ 20 mm) und S2 (30 mm – 60 mm) kennzeichnen die zwei verschiedenen Sortierprozessvarianten und unterscheiden sich in der Maschenweite bei der Feinkornabsiebung in den LVP-Sortieranlagen. S– umfasst die Anlagen, die die genannte Fraktion nicht aussortieren und nicht für ein Recycling bereitstellen.

Der erste Schritt bei den Verwertern von PPK aus LVP ist es, das Papier zu durchfeuchten, damit sich die Wasserstoffbrückenbindungen zwischen den Fasern auflösen und die Einzelfasern freibeweglich werden, so dass daraus eine pumpfähige Suspension resultiert (Blechschmidt, 2011). Dieser Prozess wird auch als Desintegrieren/Suspendieren bezeichnet. Im Sprachgebrauch der PPK-Verwerter werden für diesen Schritt auch die Begriffe Auflösen oder Zerfasern bezeichnet. Grundsätzlich sind zwei verschiedene Systeme zur primären Desintegration im Einsatz: Pulper (Trogauflöser) sowie Auflösetrommeln. Die Verwertungsanlagen für PPK aus LVP wurden nicht gefragt, welches der beiden Systeme sie einsetzen. Anhand der angegebenen Stofflösezeiten ist jedoch zu vermuten, dass es sich überwiegend um herkömmliche Pulper handelt. Es ist geplant, das System für die Zerfaserung in zukünftigen Erhebungen mit abzufragen, soweit dies für die Zwecke des Mindeststandards relevant ist. Mit der primären Desintegration wird auch noch eine andere Funktion erfüllt: unerwünschte papierfremde Bestandteile, wie beispielsweise Kunststofffolien, Textilien, Drähte und Kleberückstände werden abgelöst. Folien sollten bei der Desintegration wenig zerkleinert werden, damit sie besser abgetrennt werden können. Des Weiteren werden grobe Schwerteile in diesem Prozess abgeschieden.

Nach mehreren Aufbereitungsstufen (Reinigung und Sortierung) des Faserstoffs folgt die Sieb-, Press- und Trockenpartie der Papiermaschine, in der das finale Papierprodukt hergestellt wird.

Abbildung 32: Schematische Darstellung der Pfadbeschreibung für die Sortierung und Verwertung von PPK aus LVP



Quelle: eigene aktualisierte Darstellung nach Grummt (2022), Umweltbundesamt, auf Grundlage von Dehoust et al. (2021)

3.10.3 Ermittlung der Praxis der SuV für PPK aus LVP

Aus den Verarbeitungsmengen der LVP-Sortierer für 2022, als auch aus den Verwertungszuführungsmengen aus dem MSN 2021, kann $P(A_{SuV})$ für PPK aus LVP berechnet werden. Die Papierfabrik Delkeskamp, welche auch die Fraktion 550 verarbeitete, wurde im Spätsommer 2022 geschlossen und die Anlage verkauft (Delkeskamp, 2022; EUWID Verpackung, 2023). Da es sich bei der Anlage um eine der bedeutendsten Papierfabriken für das Recycling der Fraktion PPK aus LVP handelte, betrachten wir für die Fraktion 550 die folgenden zwei Szenarien, bei denen die Verteilung auf die Pfade in Abbildung 33 für PPK aus LVP dargestellt ist:

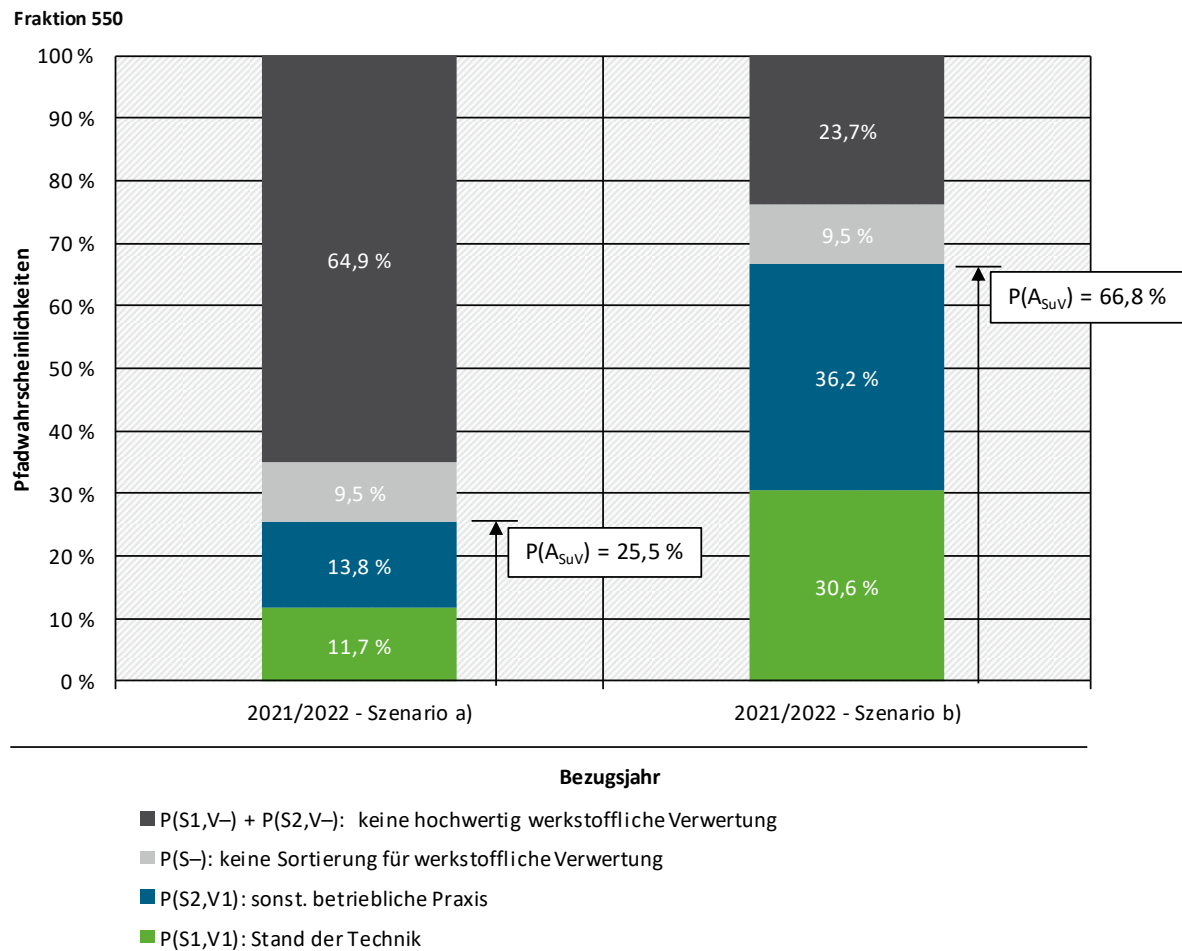
- a) Prämisse, dass die Mengen, die bisher zu Delkeskamp gingen, keiner hochwertigen werkstofflichen Verwertung zugeführt würden. $P(A_{SuV})$ beträgt in diesem Szenario für die Bezugsjahre 2021/2022 25,5 %. Wir definieren für PPK aus LVP die Pfadwahrscheinlichkeit $P(S1,V1)$ mit 11,7 % als Stand der Technik. Bei dieser Variante werden auch kleine Verpackungen sortiert (Feinkornabsiebung bei ≤ 20 mm) und anschließend hochwertig werkstofflich verwertet. Als sonstige betriebliche Praxis wurde $P(S2,V1)$ mit 13,8 % ermittelt. Diese Wahrscheinlichkeit umfasst eine Feinkornabsiebung bei 30 mm – 60 mm sowie eine hochwertige werkstoffliche Verwertung. Die Wahrscheinlichkeiten, dass keine hochwertige werkstoffliche Verwertung stattfindet (Varianten mit V– und S–) betragen insgesamt 74,4 %.
- b) Prämisse, dass die Mengen, die bisher zu Delkeskamp gingen, einer hochwertigen werkstofflichen Verwertung zugeführt würden (Referenzanlage). $P(A_{SuV})$ beträgt in diesem Szenario für die Bezugsjahre 2021/2022 66,8 %. Wir definieren für PPK aus LVP die Pfadwahrscheinlichkeit $P(S1,V1)$ mit 30,6 % als Stand der Technik. Bei dieser Variante werden auch kleine Verpackungen sortiert (Feinkornabsiebung bei ≤ 20 mm) und anschließend hochwertig werkstofflich verwertet. Als sonstige betriebliche Praxis wurde $P(S2,V1)$ mit 36,2 % ermittelt. Diese Wahrscheinlichkeit umfasst eine Feinkornabsiebung bei 30 mm – 60 mm sowie eine hochwertige werkstoffliche Verwertung. Die Wahrscheinlichkeiten, dass keine hochwertige werkstoffliche Verwertung stattfindet (Varianten mit V– und S–) betragen insgesamt 33,5 %.

Bei den meisten Anlagen werden zur Verbesserung der Produktqualität weitere Inputqualitäten aus anderer Herkunft gemeinsam mit den Systemmengen verarbeitet, beispielsweise Systemmengen aus dem Ausland, Produktionsabfälle (z. B. Stanz- und Schnittabfälle), Primärrohstoffe oder gewerbliche Abfallmengen.

Die Fraktion PPK aus LVP wird oftmals als Beimischung gemeinsam mit anderen besseren Papierqualitäten aus dem Blauen System verarbeitet. In der Altpapiersortenliste DIN EN 643 wird die Fraktion PPK aus LVP nicht aufgeführt (DIN, 2014). Verwerter von PPK aus LVP teilten mit, dass die Fraktion einen hohen Verschmutzungsgrad (u. a. durch Lebensmittelanhaftungen und andere Inhalte der gemischten Sammlung), einen hohen Wassergehalt sowie viele Störstoffe besitzt. Diese Aussage wird auch von Bothe (Bothe, 2015) getätigt. Die eben genannten Fraktionsinhalte führen zu einem erschwerten Recycling und einer verringerten Faserausbeute. Der Wassergehalt und der Verschmutzungsgrad können bei der Lagerung zu Schimmelbildung führen und Ungeziefer anlocken. Die Lagerdauer der Ballen sei deshalb nur begrenzt. Die Aufbereitung des Prozesswassers muss so ausgestattet sein, dass die organischen Anteile der Fraktion PPK aus LVP ausreichend abgereinigt werden können. Zudem sind Papierfabriken, die Primär- oder auch Sekundärverpackungen für Lebensmittel produzieren, gemäß der 36. Empfehlung des Bundesinstituts für Risikobewertung ausgeschlossen, wenn „PPK aus Gesamtmüll-Sortieranlagen und aus der Mehrkomponenten-Erfassung“ verwendet werden (BfR, 2023).

Weiterhin wurden die Verwerter nach der Stofflösezeit befragt. Die Zeit für die Desintegration der Fasern hängt maßgeblich von den eingesetzten Verpackungen, der Qualität der Verpackungen sowie dem verwendeten System (Pulper oder Auflösetrommel) ab. Bei der kommenden Totalerhebung ist geplant, das Stofflösesystem zur Ermittlung der Praxis der SuV mit abzufragen, soweit dies für Zwecke des Mindeststandards von Belang ist. Verwerter der Fraktion PPK aus LVP gaben zwischen 5 Minuten und 20 Minuten als Stofflösezeiten an. Als maximale Temperaturen bei der Stofflösung wurden für PPK aus LVP Werte zwischen 30 °C und 50 °C genannt. Die Papiertrocknung findet bei Temperaturen zwischen ca. 115 °C und 200 °C statt.

Abbildung 33: Praxis der SuV für 2021/2022 für PPK aus LVP

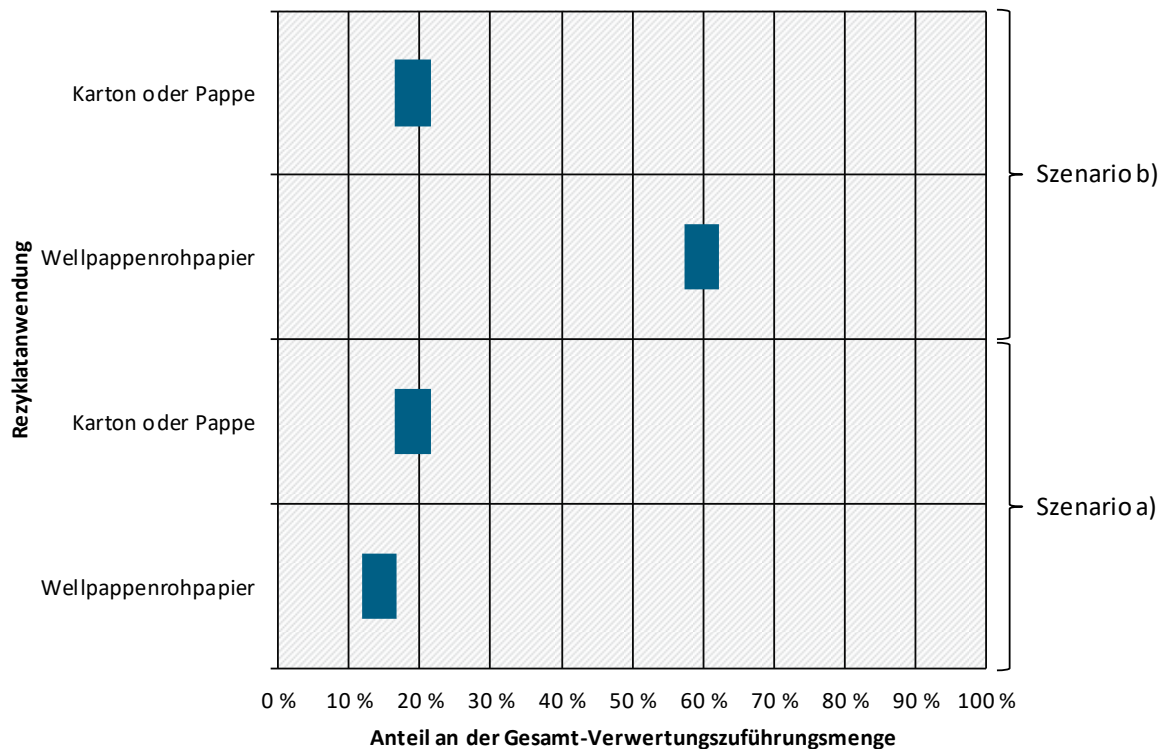


Quelle: eigene Darstellung, Umweltbundesamt, auf methodischer Grundlage von Dehoust et al. (2021)

3.10.4 Rezyklatanwendungen

In Abbildung 34 ist die Verteilung der Rezyklatanwendungen bezogen auf die Gesamt-Verwertungszuführungsmenge dargestellt. Es wird dabei zwischen Szenario a) und b) unterschieden (siehe Abschnitt 3.10.3). Die Referenzanlagen gaben als Endprodukte Wellpappenrohapiere sowie Karton und Pappe als Rezyklatanwendung an. Je nach Szenario variiert die bedeutendste Rezyklatanwendung.

Abbildung 34: Rezyklatanwendungen der Referenzanlagen (Bezugsjahr 2021) für die Verwertung von PPK aus LVP¹⁹



Quelle: eigene Darstellung, Umweltbundesamt

3.10.5 Einstufung problematischer Verpackungsmerkmale bei der Verwertung

Die Erhebung bot den Verwertern von PPK aus LVP die Möglichkeit, eine Einschätzung zur Relevanz problematischer Verpackungskomponenten zu geben, welche spezifische Probleme im Verwertungsprozess verursachen können. Die dazugehörigen Ergebnisse sind in Tabelle 14 dargestellt. Als Basis dafür diente die im Anhang 3 des Mindeststandards 2021 aufgeführte Recyclingunverträglichkeit „Nicht wasserlösliche oder nicht redispergierende Klebstoffapplikationen“ (ZSVR, 2021, S. 29). Zusätzlich wurde die Ausschlussliste der EuPIA abgefragt, um den Einfluss gefährlicher Bestandteile in Druckfarben abzuschätzen. Des Weiteren konnten zusätzliche Angaben (gelistet unter „Weitere Angaben“) zu problematischen Verpackungsmerkmalen gemacht werden. Diese konnten ebenso von den Verwertern hinsichtlich ihrer Relevanz eingeschätzt werden.

¹⁹ Aus wettbewerbsrechtlichen Gründen wurde die Spannweite geringfügig manipuliert.

Szenario a): Mengen, die bisher zu Delkeskamp gingen, werden keiner hochwertigen werkstofflichen Verwertung zugeführt;

Szenario b) Mengen, die bisher zu Delkeskamp gingen, werden einer hochwertigen werkstofflichen Verwertung zugeführt.

Tabelle 14: Einschätzung der PPK aus LVP-Verwerter zu problematischen Verpackungsmerkmalen (Gesamtanzahl an Referenzanlagen: 4)

Problematische Verpackungsmerkmale	Problem unbekannt	kein Problem	Problem nicht gelöst, aber aufgrund geringer Mengenrelevanz bedeutungslos	Problem bekannt, technisch		keine Angabe
				weitgehend gelöst	nicht gelöst	
Nicht wasserlösliche oder nicht redispergierende Klebstoffapplikationen	0	0	0	1	2	1
Komponenten der EuPIA-Ausschlussliste	2	1	0	0	0	1

Quelle: Tabelle basierend auf Grummt (2022) und der aktuellen Erhebung, auf methodischer Grundlage von Dehoust et al. (2021)

Es ist festzustellen, dass die Angabe im Anhang 3 „Nicht wasserlösliche oder nicht redispergierende Klebstoffapplikationen“ des Mindeststandards überwiegend von den Verwertern bestätigt wird. Wir empfehlen den im Anhang 3 aufgelisteten Punkt weiterhin beizubehalten. Weitere Angaben wurden nicht genannt.

3.10.6 Störstoffkomponenten im Rejekt

Die Verwerter von PPK aus LVP mit Referenzanlagen wurden befragt, welche Störstoffkomponenten dem Rejekt zugeführt werden. Diese Abfrage wurde bereits von Dehoust et al. (Dehoust et al., 2021) sowie im Teilbericht 1 durchgeführt. In Tabelle 15 sind die Ergebnisse dieser Einschätzung dargestellt. Alle Verwerter gaben dabei feinkörnige, mineralische Verunreinigungen wie Sand, Steine oder Glassplitter sowie Kunststoffpartikel und Makrostickies als Störstoff an. Streichfarben, Füllstoffe, Stippen und Kurzfasern wurden jeweils von 2 der 4 Referenzanlagen angegeben. Gelingt es nicht, die Störstoffe in das Rejekt auszutragen, können sie zu Bahnabrissen in der Papiermaschine oder Qualitätsproblemen im Endprodukt führen. Je mehr Störstoffe vorhanden sind, desto geringer ist die Faserausbeute und desto höhere Entsorgungskosten bestehen für die Verwerter.

Tabelle 15: Störstoffkomponenten im Rejekt nach Einschätzung der PPK aus LVP-Verwerter (Gesamtanzahl an Referenzanlagen: 4)

Störstoffkomponente	Anzahl
Feinkörnige mineralische Verunreinigungen (Sand, Steine, Glassplitter)	4
Kunststoffpartikel	4
Makrostickies	4
Stippen	1

Störstoffkomponente	Anzahl
Kurzfasern	1
Füllstoffe	1
Streichfarben	1

Quelle: Tabelle basierend auf Grummt (2022) und der aktuellen Erhebung, auf methodischer Grundlage von Dehoust et al. (2021)

3.11 Sortierung von PPK aus dem Blauen System

3.11.1 Rücklauf der Erhebung

An insgesamt 231 PPK-Sortieranlagen im In- und Ausland wurden Erhebungsbögen versendet. Mit 45 ausgefüllten Erhebungsbögen wurde eine Rücklaufquote von 20 % erreicht. Für PPK-Sortierer mit Standort in Deutschland wurde ebenso eine Rücklaufquote von 20 % erzielt. Einige Anlagen meldeten zurück, dass sie PPK nur verpressen und keine Sortierung stattfindet. Diese Anlagen sind nicht in die Auswertung einberechnet. Anlagen, die angaben, nur Gewerbemengen (keine Systemmengen) zu sortieren, sind ebenso nicht in der Auswertung betrachtet. Wir gehen davon aus, dass viele der angeschriebenen PPK-Sortieranlagen, die sich bisher nicht zurückmeldeten, aktuell nicht mehr in Betrieb sind.

Da es sich bei den PPK-Sortieranlagen nicht um Letztempfängeranlagen handelt, konnten keine Mengen aus dem MSN 2021 verwendet werden. Die PPK-Sortierer wurden nach der Verarbeitungsmenge aus der haushaltsnahen Sammlung in 2021 und 2022 befragt. Die Summe liegt dabei bei 1.175.000 t in 2021 und bei 1.538.000 t in 2022 (gerundet auf 1.000 t/a). Die Gesamtmengen sind nicht vollständig, da einige Anlagen keine Mengen und einzelne Anlagen die Gesamtmenge von Grünen Tonnen (plus) angaben. Über die Grüne Tonne (plus) werden sowohl PPK als auch LVP gesammelt (AVR UmweltService GmbH, o. J.). Damit wurden 28 % der Sammelmenge 2020 der haushaltsnahen Sammlung an Altpapier (5.512.000 t, Statistisches Bundesamt (Destatis), 2023, gerundet auf 1.000 t/a) abgedeckt. In diesen Mengen sind jedoch nicht nur PPK-Verpackungen, sondern größtenteils grafische Papiere (Zeitschriften, Zeitungen, etc.) sowie zum Teil auch faserbasierte Verbundverpackungen enthalten. Die Gesamtmenge der Rückläufer ist demnach nur schwer mit der eben angegebenen Gesamtmenge in der haushaltsnahen Altpapiererfassung zu vergleichen. Die Erhebung für PPK-Sortieranlagen kann möglicherweise nicht als repräsentativ angesehen werden.

Bei PPK-Sortieranlagen kann zwischen den folgenden Eingangsmaterialien unterschieden werden: grafische Papiere (Druck- und Schreibpapiere), Verpackungspapiere und Spezialpapiere (Blechsmidt, 2011). Für den Mindeststandard sind nur die Verpackungspapiere (systembeteiligungspflichtige Verpackungen) relevant.

Die Angaben der einzelnen Anlagen werden zum Schutz von Betriebs- und Geschäftsgeheimnissen und aus wettbewerbsrechtlichen Gründen vertraulich behandelt und nicht veröffentlicht.

Erhebungsbogen PPK-Sortierer

► Rücklaufquote: im In- und Ausland: 20 % (45/231); im Inland: 20 % (45/226)

- Summe Verarbeitungsmenge Systemmengen aus der haushaltsnahen Sammlung der PPK-Sortieranlagen, die einen Fragebogen zurücksendeten (ohne Sortieranlagen, die nur PPK verpressen): 2021: 1.175.000 t und 2022: 1.538.000 t (Mengen gerundet auf 1.000 t/a). Hinweis: Einige Anlagen gaben keine Menge an und einige Anlagen gaben die Gesamtmenge von Grünen Tonnen (plus) an.

3.11.2 Pfadbeschreibung

Abbildung 35 zeigt die Pfadbeschreibung für die PPK-Sortierung. Die Grundlage für die Pfadbeschreibung bildet ein Gespräch mit einer Expertin vom UBA, der Anforderung- und Bewertungskatalog von cyclos-HTP in der Version 5.1 (Institut cyclos-HTP GmbH, 2022) sowie ein Artikel von Hanke & Tempel (2014).

PPK-Verpackungen werden i. d. R. haushaltsnah über die Blaue Tonne entsorgt. Die von anderen Abfallstoffen getrennte Sammlung von Altpapier ermöglicht eine hochwertige Verwertung.

Vereinzelt gaben PPK-Sortieranlagen an, PPK nur manuell auszusortieren. Die manuelle Sortierung wird jedoch zunehmend von verschiedenen Prozesstechniken unterstützt und ersetzt.

Zunächst wird das Material kontinuierlich zugeführt und vereinzelt (Aufgabe-/Dosierbunker). Dies dient der Steigerung der Sortierqualität. Anschließend erfolgt eine Klassierung in verschiedene Größenklassen (Grob- und Feinabsiebung). Innerhalb der Grobabsiebung werden großflächige Kartonagen (ca. > DIN A4) separiert. Diese werden anschließend dem Bunker für Kartonagen und Pappe zugeführt. Über eine Feinabsiebung werden Kleinteile abgesiebt (z. B. klein gerissenes Büropapier). Über die Feinabsiebung werden auch Störstoffe aussortiert, z. B. Büroklammern, Korken, Glasscherben (Hanke & Tempel, 2014). Die Klassierung kann z. B. über Ballistikseparatoren oder Scheibensiebe ausgeführt sein (Hanke & Tempel, 2014; Putz & Weinert, 2010). Etwa die Hälfte der Gesamtmenge der Rückläufer läuft über Anlagen, die angeben, dass ein Feinsortierrest vorhanden ist. Der Feinsortierrest wird gemäß der Rückmeldungen entweder der Sorte Mischpapier zugegeben, energetisch verwertet oder als eigene Fraktion vermarktet. Mit der Aussortierung des Feinsortierrests wird ein wichtiger Beitrag geleistet, um unerwünschte Stoffe aus dem Altpapierkreislauf auszuschleusen. Das Band wird „entfrachtet“, um die Funktionsfähigkeit der nachfolgenden sensorgestützten Sortierung zu verbessern. Zusätzlich wird die Staubbelastung reduziert (Hanke & Tempel, 2014).

Das mittelgroße Material durchläuft anschließend den weiteren Prozess.

Über Spike-Technologien können Pappen und Kartonagen auf Metallnägeln („Spikes“) auf einer rotierenden Walze aufgestochen und von der Deinkingware auf dem Förderband getrennt werden. Materialien, die eine geringe Biegesteifigkeit besitzen (z. B. Zeitungen, Magazine und Prospekte), also insbesondere flexible grafische Papiere werden nicht von den Spikes erfasst. Die nicht aufgestochenen Papiere werden dem Bunker für Deinkingware zugeführt. Die aufgestochenen Pappen und Kartonagen werden anschließend von den Spikes abgestreift (Hanke & Tempel, 2014; WGV Recycling GmbH, o. J.).

Das aktuelle Hauptziel der PPK-Sortierung ist üblicherweise die Herstellung qualitativ hochwertiger Deinkingsorten (Zeitungen, Zeitschriften, etc.) mit möglichst wenig Störstoffen. Zusätzlich fallen Verpackungen (Kaufhausaltpapier) sowie Mischpapier als weitere Sorten an (Hanke & Tempel, 2014).

Über optische NIR-Sensoren und VIS-Kameras (VIS steht für sichtbares Licht, englisch visible) können innerhalb einer Negativsortierung aus einem bestimmten Gutstrom nicht gewünschte braune und Nicht-Deinkingpapiere (z. B. Kartons oder Faltschachteln) über Druckluftdüsen

ausgetragen (AP Concept GmbH & Co. KG, o. J.) werden. Die Trennung in der sensorgestützten Sortiereinheit kann dabei nicht nur auf Material, sondern auch auf Farbe (z. B. braun oder grau) erfolgen. Zudem können an dieser Stelle auch Kunststoffe detektiert und aussortiert werden (Hanke, 2017). Laut der Befragung erfolgt die Separation über NIR-Trenner üblicherweise einstufig, kann aber in moderneren Anlagen auch mehrstufig erfolgen. Dass die sensorgestützte Sortiereinheit mittlerweile teilweise mehrstufig ausgeführt ist, stimmt mit den Angaben in einem Artikel von Hanke und Tempel überein (Hanke & Tempel, 2014). Hanke und Tempel geben zudem an, dass weitere sensorgestützte Sortierstufen für eine positive Nachsortierung der Rejekte installiert sein können, um Deinkingmaterial aus dem Outputstrom zurückzugewinnen.

Handelt es sich bei dem Inputmaterial um die Grüne Tonne plus, in die sowohl Verpackungen, sonstige verwertbare Gegenstände aus Kunststoff, Metall sowie PPK eingeworfen werden dürfen, findet innerhalb der PPK-Sortieranlage wie bei der Fraktion PPK aus LVP in LVP-Sortieranlagen eine Positivsortierung auf PPK statt. Da die Grüne Tonne plus nur einen sehr geringen Anteil am gesamten LVP-Sammelgemisch ausmacht, entspricht dies nicht der generellen Praxis. Vermutlich liegt der Anteil bei unter 5 % (AVR UmweltService GmbH, o. J.).

Wenige der Anlagen gaben an, eine Magnetabscheidung und/oder Windsichtung einzusetzen. In einer Sortierkabine erfolgt i. d. R. eine manuelle Nachkontrolle, um die von den Papierfabriken gewünschte Qualität bereitstellen zu können.

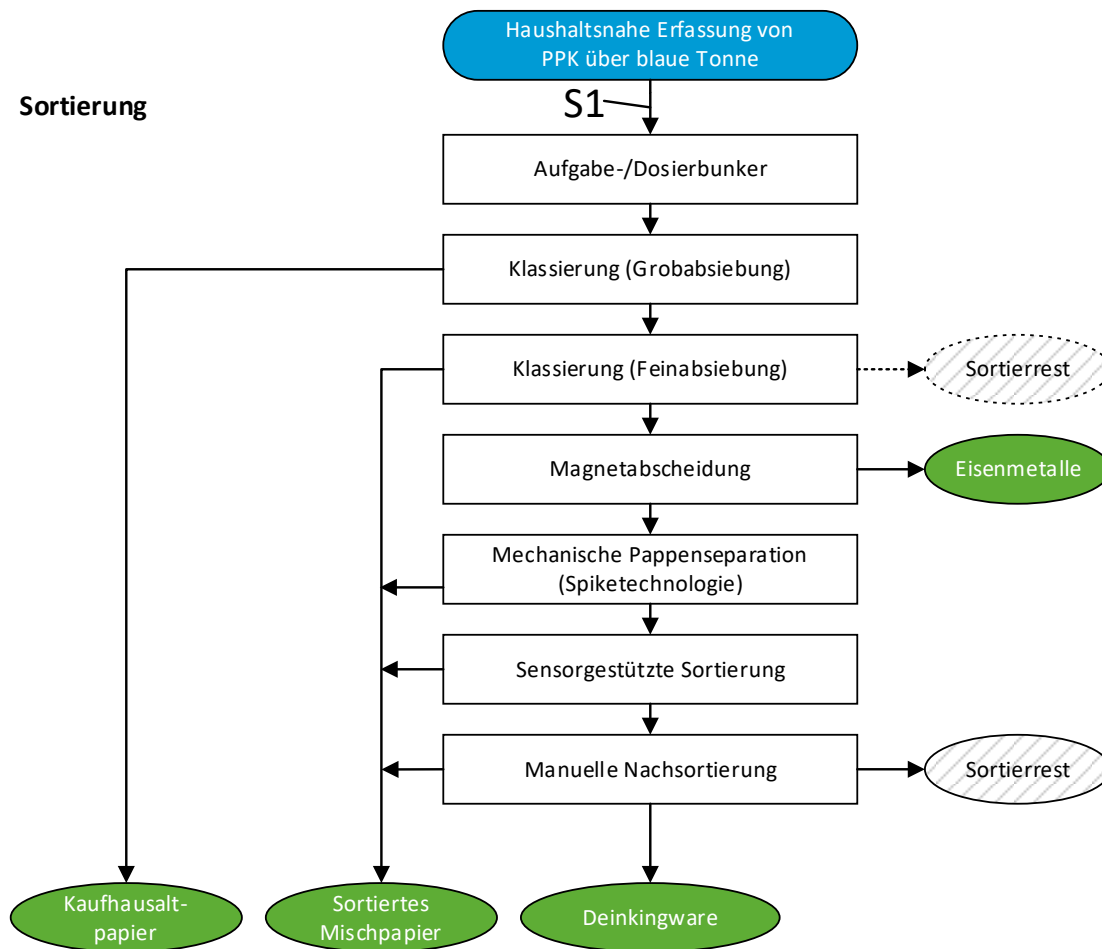
Als Outputfraktionen gibt es demnach (DIN, 2014):

- a) Deinkingware (insbesondere Altpapiersorte 1.11), bestehend aus sortierten grafischen Papieren, z. B. Zeitungen oder Zeitschriften;
- b) Kaufhausaltpapier (insbesondere Altpapiersorte 1.04), bestehend aus gebrauchten Papier- und Kartonagenverpackungen;
- c) Mischpapier (insbesondere Altpapiersorte 1.02).

Bezogen auf die Erhebung laufen in 2022 ca. 88 % der Gesamtmenge der Rückläufer über Anlagen, die eine sensorgestützte Sortierung einsetzen. 85 % der Gesamtmenge der Rückläufer laufen über Anlagen mit Sortierkabine. 77 % der Gesamtmenge der Rückläufer laufen über Anlagen mit Spike-Technologie.

Im vorliegenden Teilbericht 2 wird keine Unterscheidung zwischen verschiedenen Sortierprozessvarianten vorgenommen. Es gibt lediglich die Sortierprozessvariante S1. Zukünftige Berichte könnten eine Unterscheidung zwischen PPK-Sortieranlagen mit und ohne sensorgestützte Sortierung vornehmen. Dafür wäre eine Verbesserung der Datenbasis erforderlich.

Abbildung 35: Schematische Darstellung der Pfadbeschreibung für die PPK-Sortierung aus dem Blauen System



Legende und Erläuterung

- Ausgangsmaterial
- Nebenprodukt (energetische Verwertung)
- Hauptprodukt (hochwertige werkstoffliche Verwertung)
- Prozessstufe
- Geringe Mengenrelevanz

Quelle: eigene Darstellung, Umweltbundesamt, auf Grundlage von Institut cyclos-HTP GmbH (2022)

3.11.3 Ermittlung der Praxis der PPK-Sortierung

Im vorliegenden Teilbericht 2 wurde für PPK ein Anwendungsgrad der Sortierung $P(A_S)$ von 100 % angenommen. Diese Entscheidung basiert auf der Tatsache, dass einige PPK-Sortieranlagen keine Mengenangaben im Fragebogen machten und einige PPK-Sortieranlagen angaben, PPK lediglich zu verpressen, ohne weitere Angaben zu Menge oder Altpapiersorte zu machen. Für zukünftige Berichte sollte die Datenbasis für PPK-Sortieranlagen verbessert werden. Der finale $P(A_{SuV})$ für PPK-Verpackungen ist im Abschnitt 3.12.3 dargestellt.

Nach Auswertung der aktuellen Erhebung kann der Einsatz von NIR/VIS-Technologien (als Negativsortierung ausgeführt) sowie manuelle Nachsortierung als Stand der Praxis eingestuft werden. Technologien, welche mit künstlicher Intelligenz (KI) arbeiten, sind bereits in Pilotversuchen für PPK-Sortieranlagen im Einsatz. Laut eines Experten werden sie als wichtige Zukunftstechnologie für die PPK-Sortierung erachtet (Gespräch mit Hr. Dr. Krolle am 24.03.2023). In den Fragebögen wurden keine KI-basierten Prozesstechniken angegeben.

Die meisten PPK-Sortieranlagen gaben an, dass die Endprodukte des anschließenden Recyclingprozesses für Systemmengen nicht bekannt seien. Wenige PPK-Sortieranlagen nannten die Endprodukte Wellpappenrohapiere, Karton und Pappe sowie teilweise auch Hygienepapiere. Die Anlagen gaben an, als Verpackungspapiersorten meist 1.02 („sortiertes gemischtes Altpapier“) und 1.04.xx („Kaufhausaltpapier“) auszusortieren, vereinzelt wurde auch Sorte 1.01 („Unsortiertes gemischtes Altpapier“) angegeben (DIN, 2014).

3.11.4 Einstufung problematischer Verpackungsmerkmale bei der Sortierung

Die Erhebung bot den PPK-Sortierern die Möglichkeit, eine Einschätzung zur Relevanz problematischer Verpackungsmerkmale zu geben, welche spezifische Probleme im sensorgestützten Sortierprozess verursachen können. Die dazugehörigen Ergebnisse sind in Tabelle 16 dargestellt. Des Weiteren konnten zusätzliche Angaben (gelistet unter „Weitere Angaben“) gemacht werden. Diese konnten ebenso von den Sortierern hinsichtlich ihrer Relevanz eingeschätzt werden. Die abgefragten Punkte basieren auf dem Anhang 2 des Mindeststandards 2022 sowie Gesprächen mit Expert*innen.

Tabelle 16: Einschätzung der PPK-Sortieranlagen zu problematischen Verpackungsmerkmalen (Gesamtanzahl an Rückläufern mit sensorgestützter Sortierung: 29)²⁰

Problematische Verpackungsmerkmale	Problem unbekannt	kein Problem	Problem nicht gelöst, aber aufgrund geringer Mengenrelevanz bedeutungslos	Problem bekannt, technisch		keine Angabe
				weitgehend gelöst	nicht gelöst	
Schwarz durchgefärbt unter Verwendung rußbasierter Pigmente	10	1	6	1	4	7
Lackierte Oberfläche	4	9	2	5	3	6
Kunststoffbeschichtete Oberfläche	3	10	2	4	4	6
Thermopapieretiketten	1	9	7	0	6	6
Kunststoff-Faser-Gemische (z. B. mit Nassfestmittel)	2	9	4	0	8	6
Metallisierte Oberfläche	9	3	4	0	6	7
Konstruktionsbedingter Restinhalt	9	3	6	0	3	8

²⁰ Bei Mehrfachantworten wurde nur die Antwort mit der kritischeren Bewertung der Problematik berücksichtigt.

Problematische Verpackungsmerkmale	Problem unbekannt	kein Problem	Problem nicht gelöst, aber aufgrund geringer Mengenrelevanz bedeutungslos	Problem bekannt, technisch		keine Angabe
				weitgehend gelöst	nicht gelöst	
Weitere Angaben:						
PPK-Verbundverpackungen					3	
Nassfeste Papiersorten					1	
Klebstoff (sporadisch, saisonal)					1	
Folien			7			

Quelle: Tabelle basierend auf der aktuellen Erhebung

Hinsichtlich der Problematik „konstruktionsbedingter Restinhalt“ wurde von drei PPK-Sortierern angemerkt, dass insbesondere Lebensmittelreste und Fett von Pizzakartons problematisch seien. Ein anderer PPK-Sortierer merkte an, dass Lebensmittelanhaftungen bei der manuellen Sortierung hinsichtlich der Hygiene problematisch seien. Zudem würden Lebensmittelanhaftungen Schädlinge anziehen.

Im Mindeststandard 2022 wurde der Umgang mit konstruktionsbedingten Füllgutresten im Mindeststandard bereits konkretisiert und Beispiele aufgenommen (z. B. Silikone, Acrylate, Polyurethane) (ZSVR, 2022).

Einige der Verpackungsmerkmale wurden teilweise von PPK-Sortieranlagen als unproblematisch angesehen. Dennoch wurden alle Verpackungsmerkmale von mindestens drei der PPK-Sortieranlagen als nicht gelöstes Problem betrachtet. Es wird empfohlen, die im Anhang 2 des Mindeststandards 2022 genannten Verpackungsmerkmale, beizubehalten.

3.11.5 Störstoffkomponenten im Rejekt

Die PPK-Sortieranlagen wurden zudem befragt, welche faserbasierten Verpackungen oder -komponenten aussortiert und anschließend energetisch verwertet werden. Tabelle 17 zeigt die Ergebnisse aus der aktuellen Erhebung. 16 der 45 PPK-Sortieranlagen gaben an, dass FKN aussortiert und energetisch verwertet werden. 14 der 45 PPK-Sortieranlagen machten die Angabe, dass Silikonpapiere und Trinkhalme aussortiert werden. 11 der 45 Anlagen sortieren Kaffeebecher To-Go (Getränkebecher) sowie Thermoetiketten aus. Nur wenige Anlagen gaben an, bestimmte Lebensmittelverpackungen für z. B. Fisch oder Tiefkühlprodukte energetisch zu verwerten. Weitere Angaben, die gemacht wurden, waren beispielsweise Pizzaverpackungen. Diese werden von den jeweiligen Anlagen aufgrund der Lebensmittelrestanhaftungen aussortiert.

Die Abtrennung der genannten Verpackungen erfolgt üblicherweise über die manuelle Nachsortierung. Nur wenige Anlagen sortieren die aufgeführten Verpackungen über NIR aus. Der Anteil der aussortierten Verpackungen beträgt laut der Befragung zwischen < 1 % und 5 %,

Tabelle 17: Aussortierung und energetische Verwertung von faserbasierten Verpackungen oder -komponenten (Gesamtanzahl an Referenzanlagen: 45)

	Anzahl
Kaffeebecher To-Go (Getränkebecher)	11
Verpackungen für Tiefkühlprodukte (z. B. für Fischstäbchen, Spinat, Kräuter, Beeren)	4
Verpackungen für Fleisch/Fisch/Käse	6
Thermoetiketten	11
Silikonpapiere	14
FKN	16
Trinkhalme	14
Weitere Angaben:	
<i>Pizzaverpackung</i>	1
<i>UV-lackierte Papiere</i>	1
<i>Papiere mit Kleber</i>	1
<i>Beschichtete Papiere</i>	1

Quelle: Tabelle basierend auf der aktuellen Erhebung

3.12 Verwertung von PPK aus dem Blauen System

3.12.1 Rücklauf der Erhebung

An insgesamt 118 PPK-Verwerter im In- und Ausland wurden Erhebungsbögen versendet. Für einzelne Anlagen, die keinen Fragebogen zurücksendeten, konnte anhand der Letztempfängerzertifikate eine Aussage zur Hochwertigkeit der dort angegebenen Endprodukte getroffen werden. Die Rücklaufquoten inkl. der Klassifizierung über Letztempfängerzertifikate liegen im In- und Ausland bei 55 % und in Deutschland bei 69 %.

Die Gesamtzuführungsmenge der Verwertungsanlagen, die einen Erhebungsbogen zurücksendeten plus der Anlagen, bei denen die Klassifizierung über Letztempfängerzertifikate erfolgte, liegt für PPK gemäß MSN in 2021 bei ca. 1.519.000 t (gerundet auf 1.000 t/a). Damit wurden 80 % der Gesamtzuführungsmenge aller PPK-Verwerter aus dem MSN 2021 abgedeckt. Dieser abgedeckte Mengenanteil liegt über 70 % der Gesamtzuführungsmenge und wird damit als repräsentativ angesehen. Berücksichtigt wurden ausschließlich Letztempfängeranlagen.

Papierfabriken können zwischen den folgenden Eingangsmaterialien unterschieden werden: grafische Papiere (Druck- und Schreibpapiere), Verpackungspapiere und Spezialpapiere (Blechsmidt, 2011). Es wurden nur die PPK-Verwerter für die Befragung einbezogen, welche Verpackungspapiere als Eingangsmaterial verwenden.

Die Angaben der einzelnen Anlagen werden zum Schutz von Betriebs- und Geschäftsgeheimnissen und aus wettbewerbsrechtlichen Gründen vertraulich behandelt und nicht veröffentlicht.

Erhebungsbogen PPK-Verwerter

- ▶ Rücklaufquote (inkl. Klassifizierung über Letztempfängerzertifikate): im In- und Ausland: 55 % (65/118); im Inland: 69 % (62/90)
- ▶ Gesamtzuführungsmenge der Verwerter, die Erhebungsbögen zurücksendeten (inkl. Klassifizierung über Letztempfängerzertifikate), aus MSN 2021: 1.519.000 t; entspricht ca. 80 % der Gesamtmenge aller PPK-Verwerter i. H. v. 1.897.000 t (Datenübermittlung ZSVR an UBA am 24.11.2022; Mengen gerundet auf 1.000 t/a)

3.12.2 Pfadbeschreibung

Abbildung 36 zeigt die Pfadbeschreibung für die Verwertung von vorsortiertem PPK aus dem Blauen System. Als Grundlage der Erläuterung und der Reihenfolge der Prozesse dienten die beiden Erhebungen zur Ermittlung der Praxis der SuV, die Publikation UBA-TEXTE 11/2021 (Dehoust et al., 2021) sowie der Anforderungs- und Bewertungskatalog von cyclos-HTP in der Version 5.1 (Institut cyclos-HTP GmbH, 2022).

Das gesammelte Altpapier kann in Sortieranlagen in verschiedene Altpapierfraktionen sortiert werden (S1). Die aktuelle Praxis der Altpapiersortierung kann in Abschnitt 3.11 eingesehen werden. Anschließend wird das vorsortierte Altpapier an Papierfabriken geliefert.

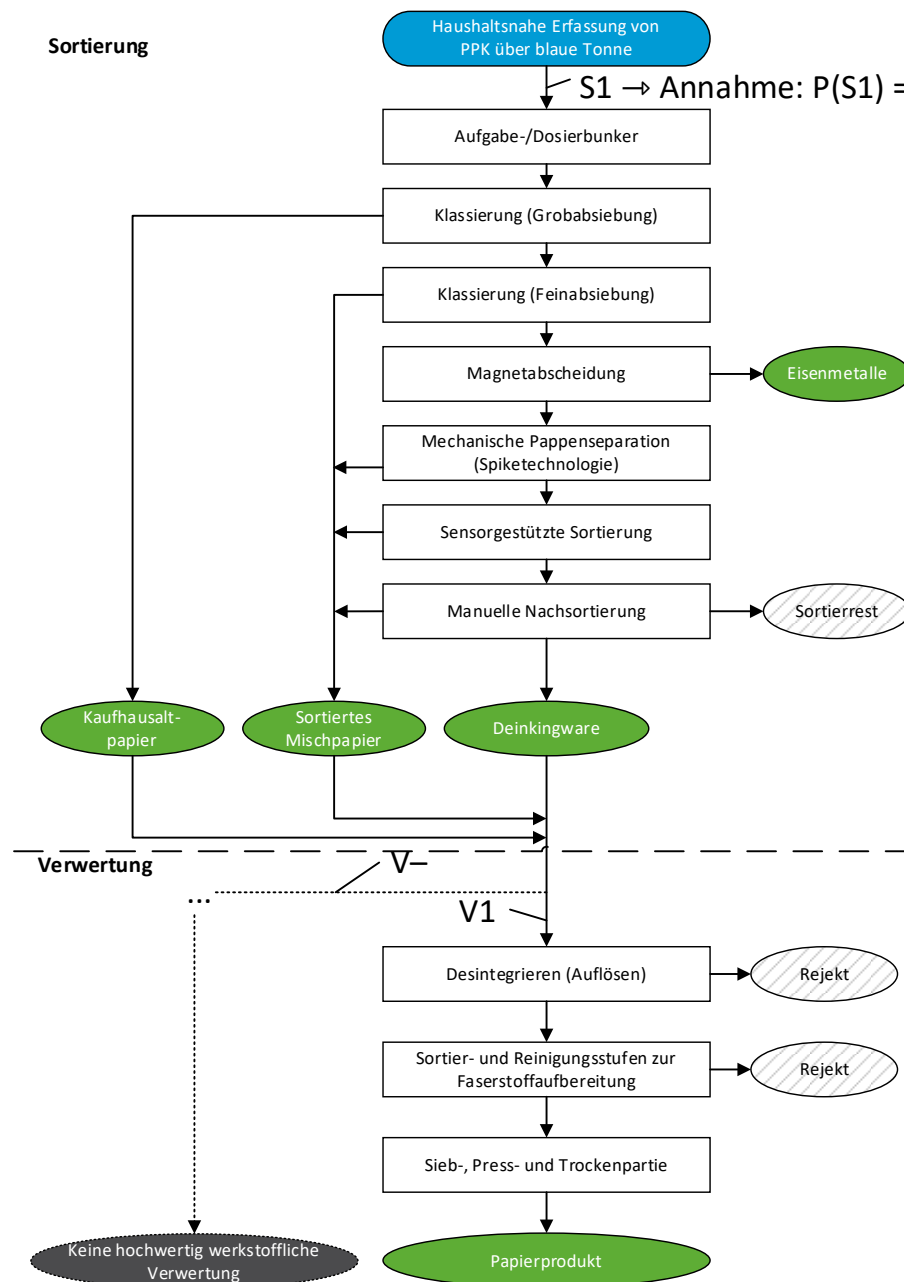
V1 umfasst PPK-Verwerter mit Referenzanlagen, in denen hochwertige werkstoffliche Verwertung stattfindet und V2 beschreibt PPK-Verwerter ohne Referenzanlagen.

Der erste Schritt bei einem PPK-Verwerter ist es, das Papier zu durchfeuchten, damit, sich die Wasserstoffbrückenbindungen zwischen den Fasern auflösen und die Einzelfasern freibeweglich werden, woraus eine pumpfähige Suspension resultiert. Dieser Prozess wird auch als Desintegrieren oder Suspensieren bezeichnet. Im Sprachgebrauch der Papierfabriken werden für diesen Schritt auch die Begriffe Auflösen und Zerfasern verwendet. Grundsätzlich sind zwei verschiedene Systeme zur primären Desintegration im Einsatz: Pulper (Trogauflöser) sowie Auflösetrommeln. Es werden sowohl kontinuierlich, als auch diskontinuierlich arbeitende Pulper verwendet. Vertikal arbeitende Trommelsysteme arbeiten immer kontinuierlich (Blechschmidt, 2011). Laut Blechschmidt sind die Scherkräfte (Zerreißkräfte) in einem Pulper mit geringer Stoffdichte erheblich größer als in einer Auflösetrommel. Dies führt dazu, dass papierfremde Bestandteile, z. B. CDs oder Kunststofffolien in einem Pulper stärker zerkleinert werden und später schwerer abtrennbar sind. Nassfeste Papiere lassen sich in Pulpern leichter auflösen. Diese These bestätigten zwei Papierfabriken, welche Auflösetrommeln verwendeten.

Mit der primären Desintegration wird auch noch eine andere Funktion erfüllt: unerwünschte papierfremde Bestandteile, wie beispielsweise Kunststofffolien, Textilien, Drähte und Kleberückstände werden abgelöst. Folien sollten bei der Desintegration wenig zerkleinert werden, damit sie besser abgetrennt werden können. Des Weiteren werden grobe Schwerteile in diesem Prozess abgeschieden. In einigen Papierfabriken wird nur bis zu einem bestimmten Stippengehalt desintegriert und die Desintegration in einer anderen Maschine fortgeführt. Dieser Schritt hat wirtschaftliche Gründe und wird als sekundäre Desintegration bezeichnet. Insbesondere aus nassfesten und geleimten Papieren können in diesem Schritt noch Fasern herausgelöst werden (Blechschmidt, 2011).

Nach mehreren Aufbereitungsstufen (Reinigung und Sortierung) des Faserstoffs folgt die Sieb-, Press- und Trockenpartie der Papiermaschine, in der das finale Papierprodukt hergestellt wird.

Abbildung 36: Schematische Darstellung der Pfadbeschreibung für die Sortierung und Verwertung von PPK aus dem Blauen System



Legende und Erläuterung

- Ausgangsmaterial
- Nebenprodukt (energetische Verwertung)
- Wahrscheinlichkeiten der Varianten werden nicht in die Anwendungsgrade einberechnet
- Hauptprodukt (hochwertige werkstoffliche Verwertung)
- Prozessstufe
- Geringe Mengenrelevanz der Zweigwahrscheinlichkeiten

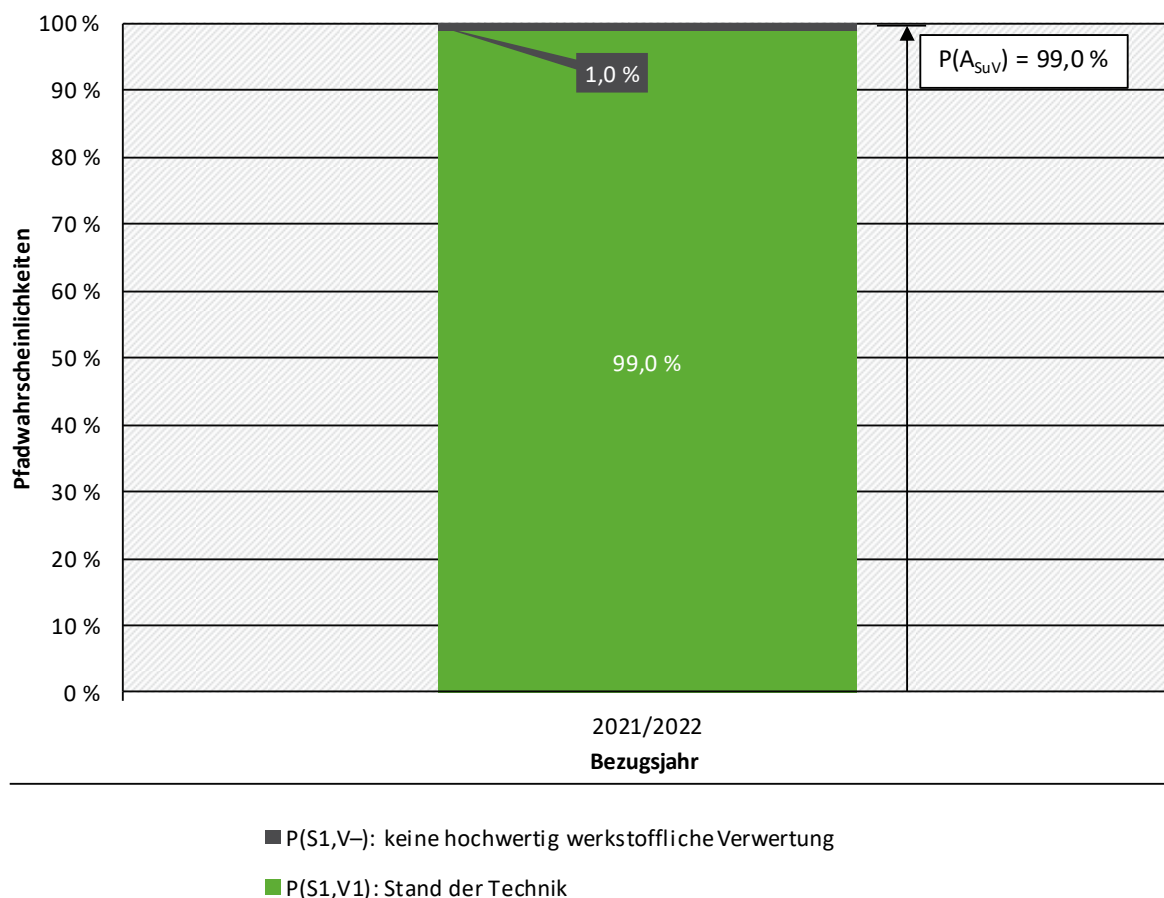
Quelle: eigene aktualisierte Darstellung nach Grummt (2022), Umweltbundesamt, auf Grundlage von Dehoust et al. (2021) und Institut cyclos-HTP (2022)

3.12.3 Ermittlung der Praxis der SuV für PPK

Wie bereits in Abschnitt 3.11.3 erläutert, wird für PPK ein $P(A_S)$ von 100 % angenommen. Aus den Verwertungszuführungsmengen gemäß MSN 2021 kann $P(A_V)$ für PPK-Verpackungen berechnet werden. $P(A_V)$ beträgt für das Bezugsjahr 2021 in Summe 99,0 %. Der finale $P(A_{SuV})$ beträgt damit 99 %. Die Verteilung der Mengen auf die in Abbildung 36 dargestellten Pfade ist in Abbildung 37 abgebildet. $P(S1,V1)$ wird als Stand der Technik eingestuft, da keine weitere Unterteilung vorgenommen wurde.

Die Wahrscheinlichkeit, dass keine hochwertig werkstoffliche Verwertung stattfindet (Variante mit V-) beträgt 1,0 %.

Abbildung 37: Praxis der SuV für 2021/2022 für PPK-Verpackungen aus dem Blauen System



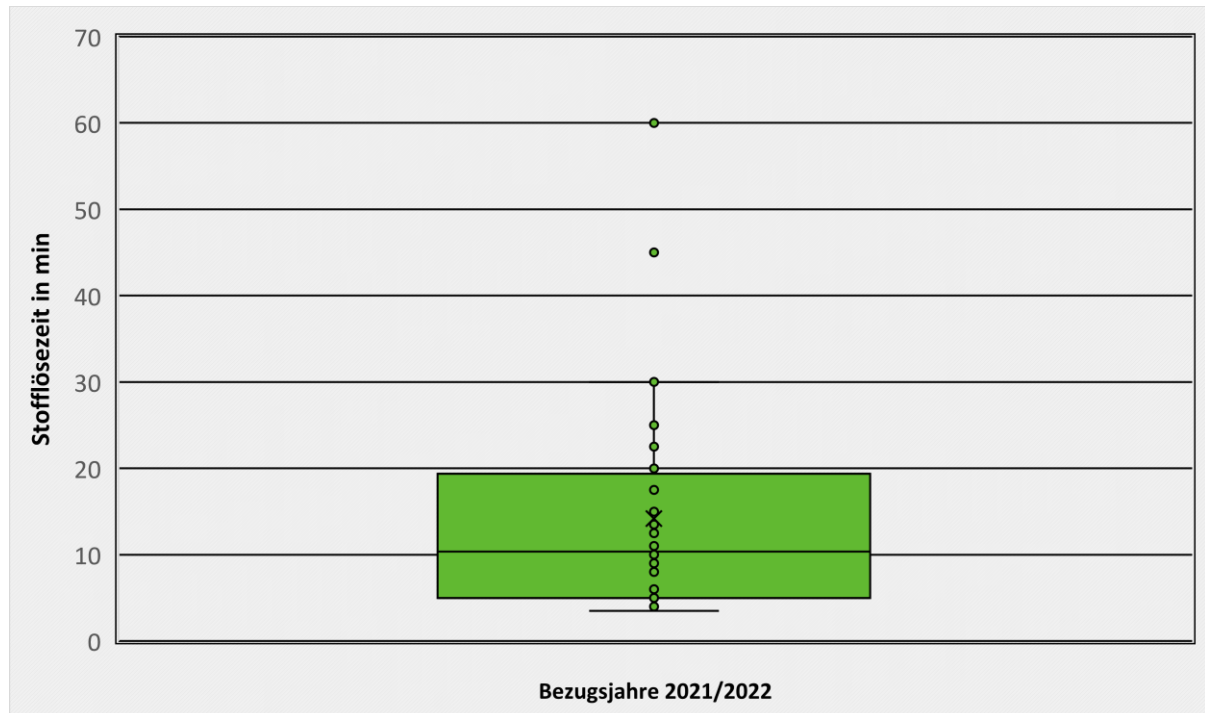
Quelle: eigene Darstellung, Umweltbundesamt, auf methodischer Grundlage von Dehoust et al. (2021)

Bei den meisten Papierfabriken werden zur Verbesserung der Produktqualität weitere Inputqualitäten aus anderer Herkunft gemeinsam mit den Systemmengen verarbeitet, beispielsweise Systemmengen aus dem Ausland, Produktionsabfälle (z. B. Stanz- und Schnittabfälle), graphische Altpapiere, Primärrohstoffe oder gewerbliche Abfallmengen.

Die PPK-Verwerter wurden in den Erhebungen nicht explizit nach dem verwendeten System zur Desintegration der Papierfasern befragt. Sie wurden nur befragt, ob eine Stofflösung vorhanden sei. Von den PPK-Verwertern wurden Stofflösezeiten zwischen 3,5 Minuten und 60 Minuten angegeben. 68 % der Gesamt-Verwertungszuführungsmenge wurde Papierfabriken zugeführt, die Stofflösezeiten < 20 Minuten angaben und 23 % solchen Papierfabriken, die ≥ 20 Minuten angaben. Die restlichen 9 % umfassen die Papierfabriken, die keine Angaben gemacht haben.

Abbildung 38 zeigt einen Boxplot mit der Verteilung der Stofflösezeiten in den Papierfabriken. Zusätzlich wurden die Papierfabriken nach der maximalen Temperatur bei der Stofflösung gefragt. Die Spannweite der maximalen Temperatur bei der Stofflösung lag dabei zwischen 25 °C und 55 °C.

Abbildung 38: Boxplot der Stofflösezeiten der Papierfabriken (Blaues System)



Quelle: eigene Darstellung, Umweltbundesamt

Die Zeit für die Desintegration der Fasern hängt jedoch maßgeblich von den eingesetzten Altpapiersorten, der Qualität dieser Sorten sowie dem verwendeten System (Pulper oder Auflösetrommel mit niedrigen, mittleren oder hohen Stoffdichten) ab. Blechschmidt gibt die folgenden Auflösezeiten an:

- Auflösetrommeln: 20 Minuten – 40 Minuten,
- diskontinuierliche Pulper: 15 Minuten – 30 Minuten,
- kontinuierliche Pulper 5 Minuten – 40 Minuten (Blechschmidt, 2011).

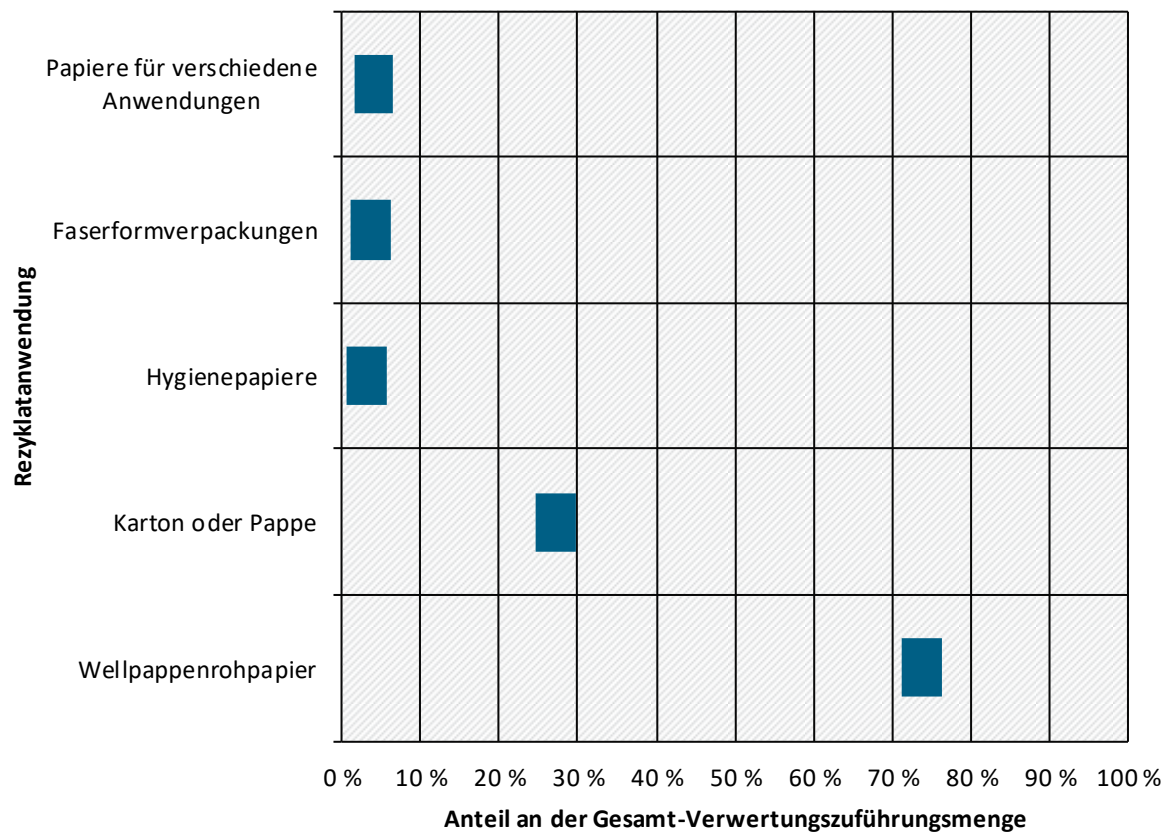
Laut mehreren PPK-Verwertern werden üblicherweise längere Stofflösezeiten für Auflösetrommeln benötigt als für Pulper. Das Stofflösesystem wurde in der aktuellen Befragung zur Ermittlung der Praxis der SuV mit abgefragt. Es gab jedoch keine Rückmeldungen dazu. An dieser Stelle wird aus eben genannten Gründen auf eine detaillierte Auseinandersetzung mit den Vor- und Nachteilen dieser Verfahren verzichtet und auf eine zukünftige Auswertung der Befragung der PPK-Verwerter verwiesen.

3.12.4 Rezyklatanwendungen

In Abbildung 39 ist die Verteilung der Rezyklatanwendungen bezogen auf die Gesamt-Verwertungszuführungsmenge dargestellt. Die Referenzanlagen gaben überwiegend Wellpappenrohapiere als Rezyklatanwendung an (zwischen 70 % und 80 %). Um die 30 % der Gesamt-Verwertungszuführungsmengen gehen in die Rezyklatanwendungen Karton oder Pappe.

Dazu gehören beispielsweise Faltschachtelkarton, Hülsenwickelkarton, Vollpappe, Graupappe oder Wickelpappe. Wenige Mengen gehen in die Endprodukte Hygienepapiere, Faserformverpackungen oder andere Papiere (z. B. Versandtaschen, Briefumschläge, Geschenkpapier).

Abbildung 39: Rezyklatanwendungen der Referenzanlagen (Bezugsjahr 2021) für die Verwertung von PPK aus dem Blauen System²¹



Quelle: eigene Darstellung, Umweltbundesamt

3.12.5 Einstufung problematischer Verpackungsmerkmale bei der Verwertung

Die Erhebung bot den PPK-Verwertern die Möglichkeit, eine Einschätzung zur Relevanz problematischer Verpackungsmerkmale zu geben, welche spezifische Probleme im Verwertungsprozess verursachen können. Da sich in der aktuellen Erhebung hierbei keine weiteren Recyclingunverträglichkeiten ergaben, wird an dieser Stelle auf die Ergebnisse der ersten Befragung im Abschnitt 3.7.4 im Teilbericht 1 (Grummt, 2022) verwiesen. Die Ergebnisse wurden bereits im EK III eingebracht.

3.12.6 Störstoffkomponenten im Rejekt

Die PPK-Verwerter wurden befragt, welche Störstoffkomponenten dem Rejekt zugeführt werden. Da sich in der aktuellen Erhebung hierbei keine weiteren Recyclingunverträglichkeiten ergaben, wird an dieser Stelle auf die Ergebnisse der ersten Befragung im Abschnitt 3.7.5 im Teilbericht 1 (Grummt, 2022) verwiesen. Die Ergebnisse wurden bereits im EK III eingebracht.

²¹ Aus wettbewerbsrechtlichen Gründen wurde die Spannweite geringfügig manipuliert.

3.13 Aufbereitung von Behälterglas

3.13.1 Rücklauf der Erhebung

An insgesamt 24 Betreiber von Glasaufbereitungsanlagen im In- und Ausland wurden Erhebungsbögen in zwei Erhebungen versendet. Mit 22 ausgefüllten Erhebungsbögen wurde eine Rücklaufquote von 92 % erreicht. Für Glasaufbereiter mit Standort in Deutschland wurde eine Rücklaufquote von 100 % erzielt. Die Gesamtzuführungsmenge der Glasaufbereitungsanlagen, die einen Erhebungsbogen zurücksendeten, liegt gemäß MSN für Behälterglas in 2021 bei 1.762.000 t (gerundet auf 1.000 t/a). Damit wurde 99 % der Gesamtmenge aller Glasaufbereiter aus dem MSN 2021 abgedeckt. Dieser abgedeckte Mengenanteil liegt über 70 % der Gesamtzuführungsmenge und wird damit als repräsentativ angesehen. An dieser Stelle ist darauf hinzuweisen, dass eine Anlage, welche 2021 nicht mehr in Betrieb war, nicht befragt wurde.

Berücksichtigt wurden ausschließlich Letztempfängeranlagen (hier: Glasaufbereitungsanlagen) und die Fraktionen 100 (Mischglas), 101 (Weißglas), 102 (Grünglas), 103 (Braunglas), 104 (Buntglas) und 105 (Glas aus LVP).

Die Angaben der einzelnen Anlagen werden zum Schutz von Betriebs- und Geschäftsgeheimnissen und aus wettbewerbsrechtlichen Gründen vertraulich behandelt und nicht veröffentlicht.

Erhebungsbogen Glasaufbereiter

- ▶ Rücklaufquote: im In- und Ausland: 92 % (22/24); im Inland: 100 % (22/22)
- ▶ Gesamtzuführungsmenge der Aufbereiter, die Erhebungsbögen zurücksendeten, aus MSN 2021 ca. 1.762.000 t; entspricht 99 % der Gesamtmenge aller Glasaufbereiter i. H. v. ca. 1.788.000 t (Datenübermittlung ZSVR an UBA am 24.11.2022; Mengen gerundet auf 1.000 t/a)

3.13.2 Pfadbeschreibung

Abbildung 40 zeigt die Pfadbeschreibung für die Aufbereitung von Behälterglas. Die Grundlage für die Pfadbeschreibung und den Text dieses Abschnitts bildet das Kapitel „Glasrecycling“ im Buch „Praxishandbuch der Kreislauf- und Rohstoffwirtschaft“ (Heinen & Bildstein, 2022, S. 297 ff.), die VDI-Richtlinie 2095 (Fachbereich Umweltschutztechnik, 2019) sowie die Publikation UBA-TEXTE 11/2021 (Dehoust et al., 2021) Im Folgenden werden die relevanten Verfahrensschritte im Hinblick auf die Verpackungsgestaltung der Behältergläser dargestellt und der Unterschied in den Pfaden erläutert:

Glas kann zu 100 % hochwertig recycelt werden. Glasverpackungen können unendlich oft eingeschmolzen werden und zu neue Glasverpackungen verarbeitet werden. Voraussetzung dafür ist eine nach Farben sortierte und möglichst störstofffreie Glaserfassung (Heinen & Bildstein, 2022). Die Glasverpackungen werden anschließend zu Glasaufbereitungsanlagen transportiert und dort nach Farben getrennt gelagert. Nach einer manuellen Vorsortierung zur Separation von Fehlwürfen und groben Störstoffen (z. B. Kunststoffbeutel, -flaschen, grobe Keramik oder Porzellanteile) folgt die Zerkleinerung der Grobkornfraktion. Diese findet bei den meisten Aufbereitern mittels eines Walzenbrechers statt. Nur wenige Anlagen verwenden dafür andere Verfahren (z. B. Hammermühle). Mehrere Glasaufbereiter sagten aus, dass Walzenbrecher materialschonender als Hammermühlen arbeiten, sodass der Feinkornanteil (i. d. R. < 5 mm – 6 mm) geringgehalten werden kann. Durch die Zerkleinerung wird den Sortiergeräten eine konstante Korngröße zur Verfügung gestellt. Des Weiteren kann der

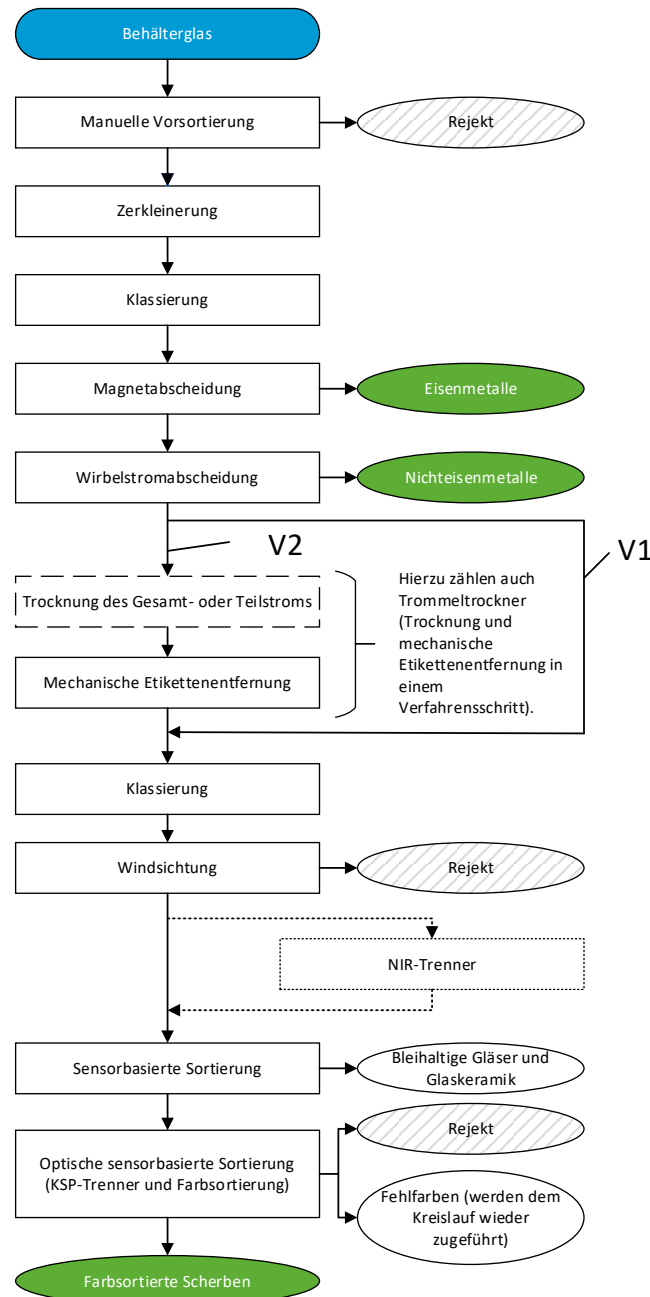
Druckluftstrom entsprechend der Korngröße angepasst werden (Institut cyclos-HTP GmbH, 2022). Der Walzenbrecher ermöglicht zudem die Entfernung der Verschlüsse von Glasverpackungen, wie Flaschen (Heinen & Bildstein, 2022).

Anschließend werden die üblicherweise farblich getrennten Scherben in verschiedene Korngrößenbereiche über großtechnische Siebanlagen klassiert. Gemäß zwei Anlagenbetreibern sind die Korngrößenfraktionen anlagenspezifisch und nicht einheitlich definiert. In der VDI-Richtlinie 2095 wird das Material in die Korngrößenfraktionen < 15 mm, 15 mm – 60 mm und > 60 mm klassiert, wobei die Fraktion < 15 mm noch einmal in die Fraktionen < 3 mm und 3 mm – 15 mm unterteilt wird (Fachbereich Umweltschutztechnik, 2019). Gemäß Heinen und Bildstein erfolgt die Klassierung in eine Grob-, Mittel- und Feinfraktion mittels eines Stangensiebs (Heinen & Bildstein, 2022).

Eine Magnet- und Wirbelstromabscheidung sorgt für die Abtrennung ferromagnetischer (Fe-Metalle) und leitfähiger Verpackungskomponenten (NE-Metalle) aus dem Glasstrom. Abgetrennte Metallkomponenten sind dabei überwiegend Deckel und Verschlüsse, wie Kronkorken. Abgetrennt wird dabei auch Drahtglas. Aufbereiter gaben an, dass diese beiden Techniken üblicherweise mehrfach in den Anlagen verbaut sind. Die abgetrennten Metallfraktionen werden der Metallverwertung zugeführt.

Mit dem Einsatz von mechanischen Etikettenentfernern (auch als Schwertwäsche, Trockenwäsche oder Label Remover bezeichnet) wird die Separierung anhaftender Papier- und Kunststoffetiketten und Verunreinigungen, wie bspw. Beschichtungen oder Staub ermöglicht. Ein Etikettenentferner besteht aus spiralförmig angeordneten verschleißfesten Förderpaddeln. Die Verwendung von Lösungsmittel oder Wasser ist dabei nicht notwendig. Die Paddel ermöglichen einen schonenden Abrieb der Glasscherben untereinander (Fachbereich Umweltschutztechnik, 2019; Pramer & Huber, 2014). Aufbereiter mit Etikettenentfernern sagten aus, dass die Polierung in nachfolgenden Sortierprozessen zu weniger Glasverlust und zu verbesserter Detektierung führt. Nicht alle Anlagen setzen mechanische Etikettenentfernern ein.

Abbildung 40: Schematische Darstellung der Pfadbeschreibung für die Aufbereitung von Behälterglas



Legende und Erläuterung

- Ausgangsmaterial
- Nebenprodukt (energetische Verwertung)
- Sonstige Nebenprodukte
- Hauptprodukt (hochwertige werkstoffliches Recycling)
- Prozessstufe
- Optionale Prozessstufe
- Geringe Mengenrelevanz der Zweigwahrscheinlichkeiten

Quelle: Grummt (2022), auf Grundlage von Dehoust et al. (2021)

Die Etikettenentfernung wird möglichst schonend durchgeführt, um hohe Feinkornverluste zu verhindern. Aus der Befragung der Glasaufbereiter ergeben sich die folgenden Sortierprozessvarianten V1 und V2, die sich hinsichtlich der Etikettenentfernung unterscheiden:

- V1: Kein Einsatz eines mechanischen Etikettenentferners oder Trommeltrockners. Lose Etiketten werden lediglich mittels Düsen abgesaugt. Üblicherweise findet keine Trocknung der Scherben statt (nasse Aufbereitung).
- V2: Einsatz eines mechanischen Etikettenentferners oder eines Trommeltrockners. Ein Trommeltrockner kombiniert Trocknung und mechanische Etikettenentfernung in einem Schritt. Durch den Abrieb der Etiketten untereinander werden anhaftende Etiketten abgetrennt (Pramer und Huber 2014). Der Gesamtstrom der Scherben durchläuft bei dem Großteil der Aufbereitungsanlagen mit Etikettenentferner eine Trocknung (üblicherweise Fließbettrockner). Aufbereiter bemerkten, dass die Trocknung eine konstante Feuchtigkeit der Scherben für den nachfolgenden Prozess sowie die Sortierfähigkeit des Feinkorns durch weniger Anhaftung am Grobkorn gewährleistet. Die Etiketten würden spröde und lassen sich somit besser entfernen. Anlagen, bei denen ein Etikettenentferner im Einsatz ist, aber zuvor keine Trocknung oder eine Teilstromtrocknung des Feinkorns stattfindet, wurden funktional identisch V2 zugeordnet.

Organik, wie z. B. Kunststoffe, PPK sowie Lebensmittelreste verbrennen meist in der Glasschmelze, jedoch können sie auch Verfärbungen hervorrufen (Hamidović, 1997; Martens & Goldmann, 2016). Leichte und lose flächige Organik, wie Kunststofffolien oder Papier werden daher in den befragten Anlagen über eine Windsichtung (z. B. über Absaugrinnen oder Zick-Zack-Sichter) abgesaugt bzw. abgetrennt.

NIR-Trenner sind Standard in der Identifizierung und Sortierung von Kunststoffverpackungen. In der Glasaufbereitung stellen sie eine neue sensorbasierte Technologie und den Stand der Technik dar (Gespräch mit Hr. Dr. Christiani am 27.03.2023). Ein Anlagenaufbereiter gab an, dass diese Technik besonders vielversprechend für die Identifizierung von transparenten Ausgussseinsätzen aus Kunststoff genutzt werden kann. Diese können aufgrund der Transparenz nicht mittels Durchlichttechnik im KSP-Trenner (KSP steht für Keramik, Steine und Porzellan) ausgeschleust werden. Des Weiteren können an Glasscherben haftende Kunststoffetiketten mittels NIR-Spektroskopie erkannt und in einer Nachstufe von der Glasscherbe abgerieben werden. Kunststoffhaltige Fehlwürfe, wie Acryl- oder Polycarbonatglas können ebenso mittels NIR-Technik detektiert werden. Nur wenige Anlagen verwenden bisher NIR-Trenner in der Glasaufbereitung, weshalb diese Art von Sortiertechnik noch keine generelle Praxis darstellt. Betreiber von Aufbereitungsanlagen gaben an, dass NIR-Trenner in den folgenden Jahren an Bedeutung gewinnen werden. Es sei geplant, diese Technik in mehreren Anlagen einzubauen. Aus wettbewerbsrechtlichen Gründen kann kein Klarwert für die Varianten mit und ohne NIR-Trenner angegeben werden.

Durch optische sensorbasierte Sortiertechnik werden KSP im KSP-Trenner mittels einer Kamera nach dem Durchlichtprinzip erkannt und über einen Druckluftstoß entfernt. KSP besitzt einen deutlich höheren Schmelzpunkt als Glas, kann in der Glaswanne nicht vollständig aufgeschmolzen werden und Einschlüsse in den Fertigprodukten in der Glashütte hervorrufen (Hahn, 2020; Heinen & Bildstein, 2022; Martens & Goldmann, 2016). In diesem Schritt werden zudem weitere nicht lichtdurchlässige Komponenten, Scherben oder Partikel über Luftdüsen aussortiert. Dazu zählen beispielsweise Holz, Kork, Metalle, Verschlüsse aus Kunststoff oder lackierte, beschichtete sowie etikettenbehaftete Scherben ohne Transluzenz. Im gleichen Prozessschritt findet eine Farbsortierung statt, welche ebenfalls über Kameras mit Durchlichttechnik realisiert wird. Blaue oder rote Glasscherben werden dem Grünglas-Strom zugeführt, da dieser die

meisten Fremdfarben aufnehmen kann. Fremdfarbige Glasscherben sowie Metalloxide können Verfärbungen in der Glasschmelze auslösen (Heinen & Bildstein, 2022; Martens & Goldmann, 2016). Die Recyclingfähigkeit von Behälterglas wird damit insbesondere über die dekorativen Verpackungsbestandteile (u. a. Farbgebung, Beschichtung, Lackierung und Etikettierung) bestimmt. Mittels herkömmlichen KSP-Trennern werden in der Regel auch dicke und dunkle Gläser mit geringen Transmissionswerten (z. B. Schwarzglas) fälschlicherweise aussortiert. Es existieren mittlerweile verbesserte KSP-Trenner mit Sensoren, die eine Unterscheidung zwischen KSP und dunklen Scherben ermöglichen (KRS Recycling Systems GmbH, o.J.; REDWAVE, 2022). Die Glasaufbereitungsanlagen wurden jedoch nicht nach dieser Technik befragt, weshalb nicht bekannt ist, ob diese in der Praxis eingesetzt wird.

Über sensorbasierte Sortiertechniken können hitzebeständige Glaskeramiken und bleihaltige Scherben (Bleiglas, besonders Bleikristallglas) aussortiert werden. Diese besitzen ebenso einen höheren Schmelzpunkt und können zu Glaseinschlüssen im Endprodukt führen. Es sind verschiedene Verfahren im Einsatz, beispielsweise UV (Ultraviolett)- oder Röntgenfluoreszenzbasierte Detektionstechnologien (Heinen & Bildstein, 2022). Mit diesen Techniken können einzelne chemische Elemente detektiert werden (REDWAVE, 2019). Ein Anlagenbauer gab an, dass die Erkennung von hitzebeständigen Glaskeramiken und bleihaltigen Gläsern auf den Elementen Zirkonium, Titan sowie Blei beruht. Fast alle Glasaufbereiter gaben an, Scherben dieser Art mit vorhandener Sortiertechnik auszusortieren. Glasaufbereiter teilten jedoch mit, dass die genannten sensorbasierten Sortiertechniken erst ab einer bestimmten Korngröße funktionieren (z. B. ab 6 mm). Martens und Goldmann stützen diese These und geben als Grund dafür an, dass bei kleineren Korngrößen die geringe Detektionszeit pro Scherbe sowie das Ausblasen durch Druckluft nicht mehr optimal funktioniere (Martens & Goldmann, 2016). Bleiglas, sonstige bleihaltige Gläser und Glaskeramiken werden im Mindeststandard in Spalte 5 im Anhang 1 als Materialien außerhalb der Spezifikation aufgeführt. Wir empfehlen, die Gläser in Spalte 5 zu belassen. Der Text in Spalte 5 ist T120 entnommen (BV Glas et al., 2014). Auf bleihaltige Kristallglasverpackungen wird in Abschnitt 3.13.4 eingegangen.

Das Standardblatt T120 legt Qualitätskriterien für Recyclingglas fest. Heinen und Bildstein geben jedoch an, dass Glasrecycler und Hersteller auch teilweise höhere Anforderungen festlegen (Heinen & Bildstein, 2022).

Mit den bisher verwendeten Techniken in den Glasaufbereitungsanlagen erfolgt keine Ausschleusung von Borosilikatglas. Borosilikatglas wurde im Mindeststandard 2022 von Spalte 5 des Anhang 1 (außerhalb der Spezifikation) in den Anhang 3 als Recyclingunverträglichkeit verschoben (ZSVR, 2022). Einsatzgebiete sind beispielsweise Auflaufgeschirr, Teekannen, Vorratsbehältnisse für z. B. Gewürze oder Müsli, Laborgläser oder Tee- und Grablichter. Drei verschiedene Anlagenbauer teilten auf Nachfrage mit, dass Borosilikatglas mit den bisherigen Techniken in Glasaufbereitungsanlagen nicht detektiert werden könne. Der Grund dafür sei die geringe Ordnungszahl von Bor im Periodensystem (5). Diese ermögliche bei Fluoreszenztechniken nur ein schwaches Signal. Das detektierte Spektrum sei umso deutlicher, je größer die Ordnungszahl des Elements ist. Die geringen Analysezeiten (wenige Millisekunden pro Scherbe) in den Anlagen sowie der Sauerstoff (Element 8) erschwere eine Detektion. Gemäß eines Anlagenbauers komme Borosilikatglas bisher nur in sehr geringen Mengen im Sammelglas vor. Da es keine großen Schäden, wie beispielsweise Glaskeramik, verursache, sei eine Investition mit einer zusätzlichen Stufe zur Separation von Borosilikatglas bisher nicht zu rechtfertigen.

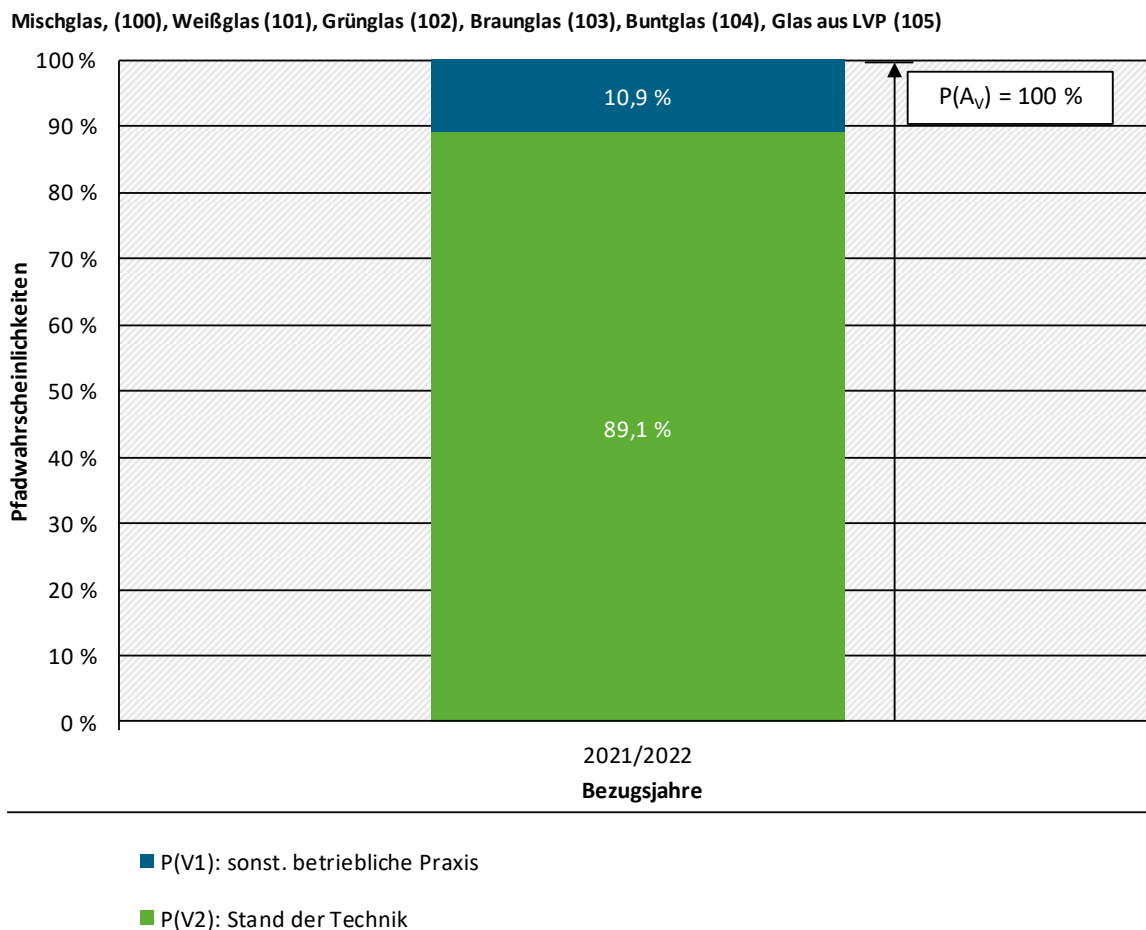
Die aufbereiteten farbsortierten Glasscherben werden anschließend in Glaswannen der Glashütten aufgeschmolzen.

3.13.3 Ermittlung der Praxis der SuV für Behälterglas

Aus den Verwertungszuführungsmengen aus dem MSN 2021 kann $P(A_{SuV})$ für Behälterglas berechnet werden. Dieser beträgt für das Bezugsjahr 2021 in Summe 100 %. Die Verteilung auf die Pfade ist in Abbildung 41 dargestellt.

Alle Glasaufbereiter gaben Endprodukte an, bei denen die Verwertungsanlage als Referenzanlage eingestuft werden kann. Als Endprodukte zählen dazu Glasscherben nach der Leitlinie T120 (BV Glas et al., 2014; Dehoust et al., 2021) sowie Behälterglas als Rezyklatanwendung. Die Variante V1, bei der die Anlage keinen mechanischen Etikettenentferner besitzt, wird als sonstige betriebliche Praxis eingestuft ($P(V1) = 10,9 \%$). Wir definieren V2 (Einsatz eines Etikettenentferners) als Stand der Technik. $P(V2)$ beträgt 89,1 %. Die Wahrscheinlichkeit, dass eine Verpackung auf eine Anlage trifft, die einen NIR-Trenner besitzt, beträgt $> 10 \%$. Dieser Wert hat sich gegenüber dem Teilbericht 1 ungefähr verdoppelt.

Abbildung 41: Praxis der SuV für 2021/2022 für Behälterglas



Quelle: eigene Darstellung, Umweltbundesamt, auf Grundlage von Dehoust et al. (2021)

3.13.4 Rezyklatanwendungen

Alle Glasaufbereiter gaben als Rezyklatanwendung Behälterglas an. Einige Anlagen gaben zusätzlich an, dass das Feinkorn, welches nicht für die Hohlglasindustrie eingesetzt werden kann, als Glasschaum oder -wolle Anwendung findet.

3.13.5 Einstufung problematischer Verpackungsmerkmale bei der Aufbereitung

Die Erhebung bot den Glasaufbereitern die Möglichkeit, eine Einschätzung zur Relevanz problematischer Verpackungsmerkmale zu geben, welche spezifische Probleme im Aufbereitungsprozess verursachen können. Die dazugehörigen Ergebnisse sind in Tabelle 18 dargestellt. Als Basis dafür dienten die im Anhang 2 und Anhang 3 des Mindeststandards aufgeführten problematischen Verpackungsmerkmale und Recyclingunverträglichkeiten (ZSVR, 2021, S. 28 ff.). Zwei weitere potentielle Probleme („Barium aus Kristallglasverpackungen“ und „Ausguss-Einsätze aus Kunststoff“) wurden zusätzlich abgefragt. „Barium aus Kristallglasverpackungen“ war im Mindeststandard 2020 als Recyclingunverträglichkeit aufgelistet und ist seit dem Mindeststandard 2021 gestrichen. „Ausguss-Einsätze aus Kunststoff“ wurden von Dehoust et al. als problematische Verpackungskomponente angegeben und deshalb im Erhebungsbogen abgefragt. Des Weiteren konnten von den antwortenden Glasaufbereitern zusätzliche Angaben (gelistet unter „Weitere Angaben“) zu problematischen Verpackungsmerkmalen gemacht werden. Diese konnten ebenso von den Aufbereitern hinsichtlich ihrer Relevanz eingeschätzt werden.

Tabelle 18: Einschätzung der Glasaufbereiter zu problematischen Verpackungsmerkmalen (Gesamtanzahl an Referenzanlagen: 22)

Problematische Verpackungsmerkmale	Problem unbekannt	kein Problem	Problem nicht gelöst, aber aufgrund geringer Mengenrelevanz bedeutungslos	Problem bekannt, technisch		keine Angabe
				weitgehend gelöst	nicht gelöst	
Blei aus Kristallglasverpackungen	0	0	1	19	2	0
Barium aus Kristallglasverpackungen	9	1	12	0	0	0
Bügelverschlüsse mit ausschließlich nicht-ferromagnetischen Metallanteilen	0	1	0	4	17	0
Glasverpackungen ohne Transparenz bzw. Transluzenz, z. B. lackierte Gläser	0	1	3	1	17	0
Ausguss-Einsätze aus Kunststoff	0	3	0	4	15	0

Weitere Angaben:

Einweg-Gewürzmöhlen mit Keramik-Mahlwerk					1	
Krankenhausgläser inkl. Verschlusskappen aus Aluminium					1	
Design-Kunststoffflaschen mit Glasoptik					2	
Schwer ablösbare Kunststoffetiketten					1	
Etiketten mit wasserfestem Klebstoff					3	

Problematische Verpackungsmerkmale	Problem unbekannt	kein Problem	Problem nicht gelöst, aber aufgrund geringer Mengenrelevanz bedeutungslos	Problem bekannt, technisch		keine Angabe
				weitgehend gelöst	nicht gelöst	
<i>Etiketten mit geringer Permeabilität für Feuchtigkeit (z. B. lackierte Etiketten, Kunststoffetiketten)</i>					3	
<i>Steingut-Flaschen</i>					2	1
<i>Zu viele Etiketten und Werbung an den Flaschen</i>					2	
<i>Komplett folierte Gebinde (Sleeves) aufgeschrumpft</i>				3		
<i>Abnehmende Materialstärke / Dünnere Flaschen</i>					4	
<i>Schwarzes, dickes Glas</i>					1	
<i>Falsche Farbzuordnung am Glascontainer durch Sleeves</i>						3
<i>Verklebte Aluminiumbanderole am Flaschenhals</i>						3

Quelle: Tabelle basierend auf Grummt (2022) und der aktuellen Erhebung, auf methodischer Grundlage von Dehoust et al. (2021)

Es ist festzustellen, dass die Angaben im Anhang 2 und 3 des Mindeststandards 2021 überwiegend von den Glasaufbereitern bestätigt werden. Wir empfehlen, diese weiterhin im Mindeststandard aufzulisten.

- Glasaufbereiter betrachteten Blei aus Kristallglasverpackungen (z. B. Behältnisse aus Kristallglas mit Bleioxid) überwiegend als weitgehend technisch gelöst. Bleihaltiges Material ist für die Glashütte ungeeignet und wird ausgeschleust. Die Separation bleihaltiger Scherben durch sensorbasierte Sortierung gehört zum Stand der Technik und trägt dazu bei, den Bleigehalt im Behälterglas zu reduzieren. Bis auf eine Anlage mit geringer Mengenrelevanz gaben alle Glasaufbereiter an, Scherben dieser Art mittels spezieller Technik auszusortieren. Die Separation ist allerdings nur ab einer bestimmten Korngröße beherrschbar (z. B. 6 mm) und führt zu hohen Glasverlusten. Wir empfehlen deshalb Blei aus Kristallglasverpackungen weiterhin im Anhang 3 des Mindeststandards als Recyclingunverträglichkeit aufzuführen.
- Barium aus Kristallglasverpackungen war im Anhang 3 des Mindeststandards 2020 gelistet. Im Mindeststandard 2021 wurde es jedoch aufgrund geringer Relevanz entfernt und auch im Mindeststandard 2022 nicht wieder aufgenommen. Die Ergebnisse aus Grummt (2022) und der aktuellen Erhebung zeigt, dass Barium aus Kristallglasverpackungen aufgrund geringer

Mengenrelevanz kein relevantes Aufbereitungsproblem darstellt. Wir empfehlen keine wiederholte Aufnahme dieses Punktes in den Mindeststandard.

- ▶ Das Problem „Bügelverschlüsse mit ausschließlich nicht-ferromagnetischen Metallanteilen“ (z. B. in Getränkeflaschen oder Einweckgläsern) wurde von 17 der 21 Anlagenbetreiber als nicht gelöst betrachtet. Darüber hinaus bezeichneten 7 der 21 Anlagenbetreiber diese Fraktion im Textfeld „Bemerkungen“ als problematisch. Ein Aufbereiter gab an, dass Edelstahl jährlich zu 10 – 12 Reklamationen der Ware von den Glashütten führt. Nach Auskunft mehrerer Glasaufbereiter können die Bügelverschlüsse nicht über die gängigen Metallabscheidungstechniken ausgeschleust werden. Sie werden zwar bei der optischen Sortierung erkannt, allerdings bieten diese aufgrund ihrer Form nicht ausreichend Angriffsfläche für die Druckluft und werden teilweise nicht oder nur mit erheblichem Glasverlust ausgeworfen. Damit bestehe die Gefahr, metallische Verunreinigungen in die Glaswanne einzubringen. Weiterhin teilten zwei Glasaufbereiter mit, dass sich die Bügelverschlüsse ineinander verhaken oder in den Anlagen hängen bleiben. Es werde versucht, die Verschlüsse vorab manuell auszusortieren. Wir empfehlen diese Unverträglichkeit weiterhin im Mindeststandard Anhang 3 aufzulisten.
- ▶ Glasverpackungen ohne Transparenz bzw. Transluzenz, wie beispielsweise lackierte oder beschichtete Glasverpackungen sind im Anhang 2 des Mindeststandards 2021 aufgeführt und wurden von 17 der 21 Glasaufbereiter als nicht gelöstes Problem angesehen. Diese nicht transparenten/transluzenten Gläser sind nicht sortierfähig und werden dem Kreislauf entzogen. Für diese Gläser besteht ein vollständiger Glasverlust. Die Scherben werden über die optisch sensorbasierte Sortierung mangels Transluzenz als Rejekt abgetrennt. Wir empfehlen dieses Gestaltungsmerkmal weiterhin im Mindeststandard Anhang 2 aufzulisten. Im Konsultationsentwurf des Mindeststandards 2023 wurde ein Grenzwert für die Transluzenz definiert (10 %). Ab diesem Wert wird davon ausgegangen, dass ein KSP-Trenner ein Material als nicht transluzent detektiert. Der Grenzwert wurde in Laborversuchen ermittelt (ZSVR, 2023a, 2023b).
- ▶ Das Problem von Ausguss-Einsätzen aus Kunststoff wurde von 15 der 21 Anlagenbetreiber als nicht gelöst betrachtet. Zu den Ausguss-Einsätzen aus Kunststoff zählen beispielsweise Gummistopfen von Infusionsflaschen oder Kunststoffausgießer in Flaschen (z. B. Speiseölflaschen). Ausguss-Einsätze können durch optische Sortiergeräte, aber auch durch die Absaugung abgetrennt werden. Diese Störstoffe verursachen einen erheblichen Glasverlust, da Glasanteile zusammen mit den Ausgießern ausgeschleust werden. Insbesondere transparente Ausguss-Einsätze stellen ein Problem dar, da sie durch die Transparenz über das Durchlichtverfahren nicht detektiert werden können. Das Problem der Ausguss-Einsätze wäre mit NIR-Sensoren lösbar, jedoch besitzen bisher nur wenige Anlagen NIR-Technik zur Identifikation von Kunststoffen. Aufbereiter gaben an, dass sich hohe Kunststoffanteile in der Glaswanne auf die Farbreinheit in den Fertigprodukten auswirken könnten. In der Leitlinie T120 ist für lose Organik (dazu gehören auch Kunststoffe) als Grenzwert der monatliche Mittelwert von max. 300 g/t festgelegt (BV Glas et al., 2014). Dieser Punkt wurde bereits in den EK III eingebracht.

Wir empfehlen, einige der folgenden zusätzlichen Angaben der Glasaufbereiter zu berücksichtigen und mit den relevanten Akteuren im EK III zu erörtern. Der Großteil der Angaben betrifft einen erheblichen Materialverlust und hohen Sortieraufwand, jedoch keine Recyclingunverträglichkeit, die als K.O.-Kriterium verstanden werden kann und zu Problemen in den Fertigprodukten führen kann:

- ▶ Einweg-Gewürzmøhlen mit Keramik-Mahlwerk werden gemäß eines Anlagenbetreibers nicht durch optische Sortiergeräte erkannt und somit nicht durch einen Druckluftstoß ausgeworfen. Keramikkomponenten könnten somit in die Glaswanne gelangen und Einschlüsse in den Fertigprodukten hervorrufen. Im Mindeststandard 2022 wurde die folgende Formulierung im Anhang 3 aufgenommen: „Glasverpackungen mit Keramikkomponenten“ (ZSVR, 2022).
- ▶ Krankenhausgläser inkl. Verschlusskappen aus Aluminium werden gemäß eines Anlagenbetreibers aufgrund der kleinen Verpackungsgröße oft nicht im Walzenbrecher zerkleinert und sind damit schwer auszuschleusen. Dieser Punkt wurde bereits in den EK III eingebracht.
- ▶ Design-Kunststoffflaschen mit Glasoptik werden gemäß zweier Anlagenbetreiber aufgrund der Transparenz und Optik in der manuellen Vorsortierung als Glas fehldeklariert. Die Kunststoffflaschen werden nicht im Brecher zerkleinert und können zu Verstopfungen in den Aufbereitungsanlagen führen. Da es sich hier um einen Fehlwurf aus einem anderen Werkstoff handelt, sprechen wir keine Empfehlung einer Aufnahme in den Mindeststandard aus.
- ▶ Glasaufbereiter teilten mit, dass Kunststoffetiketten einen Trend darstellen. Diese werden beispielsweise für Glasverpackungen verwendet, um den Inhalt der Verpackung durch ein transparentes Etikett sichtbar zu gestalten oder einen Direktdruck („No-Label-Look“) nachzuahmen. Etiketten mit wasserfestem Klebstoff sowie geringer Permeabilität für Feuchtigkeit (wie z. B. Kunststoffetiketten oder lackierte Etiketten) wurden von jeweils drei Altglasaufbereitern als problematisch eingestuft. Des Weiteren sei ebenso die Kombination aus beiden eben genannten Etiketten-Klebstoff-Kombinationen möglich. Ein weiterer Aufbereiter gab schwer ablösbare Kunststoffetiketten als nicht gelöstes Problem an. Das Problem verklebter Aluminiumbänderolen am Flaschenhals wurde ebenso von 3 Anlagenbetreibern genannt. Die Aluminiumbänderole reibe sich im Walzenbrecher vom Glas ab und führe zu kleinen Aluminiumstücken, welche in die Glaswanne gelangen können. Scherben mit anhaftenden Etiketten werden üblicherweise im KSP-Trenner ausgeworfen. Dies entziehe dem hochwertigen Glasrecycling erhebliche Glasanteile. Etikettenentferner oder Trommeltrockner können dazu beitragen, den Glasverlust zu verringern. NIR-Trenner ermöglichen die Detektion von Etiketten auf Scherben, sodass diese in einer nachfolgenden Stufe („Recovery-Stufe“) die mechanische Etikettenentfernung (nochmals) durchlaufen können. Bisher verwenden nur wenige Aufbereiter diese Technik. Im Mindeststandard 2022 wurde die folgende Formulierung unter 4.2 aufgenommen: „Bei mit Kunststoffhaftetiketten versehenen Glasverpackungen ist der von diesen Etiketten abgedeckte Glasanteil nicht dem verfügbaren Wertstoffanteil zuzurechnen, sofern es sich um wasserfeste/hydrophobe Haftetiketten handelt.“ (ZSVR, 2022).
- ▶ Steingut-Flaschen (gehören zum Werkstoff Keramik) zählen i. d. R. zu den systembeteiligungspflichtigen Verpackungen, gehören allerdings nicht in die Altglassammlung. Steingut führt zu unerwünschten Einschlüssen in den Fertigprodukten, da es aufgrund eines höheren Schmelzpunktes in der Glaswanne nicht schmilzt (Hahn, 2020). Für Steingut-Flaschen besteht derzeit kein Verwertungspfad. Diese werden entweder bei der manuellen Vorsortierung oder über den KSP-Trenner in der Glasaufbereitungsanlage aussortiert, sofern sie fälschlich im Altglas entsorgt wurden. Steingutflaschen, die als Verkaufsverpackung gedient haben, können im gelben Sack bzw. der gelben Tonne entsorgt werden. Wir empfehlen, Keramikverpackungen in der folgenden Einleitung des Anhang 1 des Mindeststandards zusätzlich mit aufzuführen: „Für nicht genannte Verpackungstypen

und Werkstoffe (vgl. Spalte 1 in Verbindung mit Spalte 2), wie z. B. biologisch abbaubare Kunststoffe oder Naturmaterialien wie Holz, ist grundsätzlich vom Fehlen einer Recyclinginfrastruktur auszugehen. Sie werden üblicherweise im Sortierprozess nicht entnommen, erfahren deshalb kein Recycling und sind grundsätzlich als nicht recyclingfähig einzustufen“ (ZSVR, 2022, Anhang 1).

- ▶ Aufgeschrumpfte komplett folierte Gebinde (Sleeves) werden üblicherweise abgesaugt, nachdem die Glasverpackung zerkleinert wurde. Die verwendete Technik zur Zerkleinerung des Glases (z. B. Walzenbrecher) hat vermutlich einen Einfluss auf die Abtrennung des Sleeves. Bei Sleeves wird unterschieden zwischen Komplett-Umhüllungen (Full-Body-Sleeves) und partiellen Umhüllungen (Teil-Sleeves). Darüber hinaus gibt es Sleeves mit und ohne Perforation an der Siegelnaht. Weiterhin unterscheiden sich Sleeves darin, ob das Sleeve über die Kante des Flaschenbodens hinausragt oder ob es mit der Bodenkante abschließt. Sleeves können dazu beitragen, dass Verbraucher*innen die Glasverpackungen dem falschen Glascontainer zuordnen, da die Farbe des Sleeves anstatt der Flaschenfarbe berücksichtigt wird (diese Problematik wurde von 3 der 21 Anlagenbetreiber genannt). Es ist weiterhin zu beachten, dass der Kunststoff des ausgeschleusten Sleeves nach der derzeitigen Praxis der SuV werkstofflich nicht verwertet wird. Wir empfehlen zunächst Untersuchungen in Glasaufbereitungsanlagen durchzuführen, um den Ausschuss bei Vorhandensein verschiedener Sleeves zu quantifizieren. Die eben beschriebene Problematik der Sleeves wurde bereits in den EK III eingebracht.
- ▶ Abnehmende Materialstärke bzw. dünnere Flaschen können zu einem größerem Feinkornanteil führen und somit die Ausbeute für die Glashütte verringern. Hier besteht ein Spannungsfeld zwischen Materialeinsparung und Design für ein möglichst optimales Recycling. Wir empfehlen diesen Aspekt nicht im Mindeststandard darzustellen, da er kein Problem darstellt, dass sich im Mindeststandard abbilden lässt.
- ▶ Schwarzes dickes Glas wird aufgrund fehlender Transluzenz gemäß eines Glasaufbereiters im KSP-Trenner als Störstoff abgetrennt, obwohl es sich dabei um Glas handelt. Dieser Punkt steht bereits als Punkt „Glasverpackungen ohne Transparenz bzw. Transluzenz, z. B. lackierte Gläser“ im Mindeststandard Anhang 2 (ZSVR, 2022, Anhang 2). Im Konsultationsentwurf des Mindeststandards 2023 wurde ein Grenzwert für die Transluzenz definiert (10 %). Ab diesem Wert wird davon ausgegangen, dass ein KSP-Trenner ein Material als nicht transluzent detektiert (ZSVR, 2023a).

4 Empfehlungen zur Berücksichtigung der Praxis der SuV im Mindeststandard gemäß § 21 Abs. 3 VerpackG

4.1 Vorhandensein von Sortier- und Verwertungsinfrastruktur

Im Folgenden werden zunächst Empfehlungen für den Anhang 1 des Mindeststandards diskutiert. Im Mindeststandard 2022 wird das Vorhandensein einer Recyclinginfrastruktur über die Fraktionsnummern in Anhang 1 Spalte 3 erfasst. Dabei wurden spezifische Abgrenzungskriterien definiert, welche sich auf die aktuelle Praxis der Sortierung und Verwertung systembeteiligungspflichtiger Verpackungen beziehen sollen. Gilt eine Sortier- und Verwertungsinfrastruktur als vorhanden, kann der im Anhang 1 des Mindeststandards angegebene Wertstoffanteil bei der Bemessung der Recyclingfähigkeit berücksichtigt werden (ZSVR, 2022). Die Abgrenzungskriterien der Spalten 3A, 3B und 3C sind im Abschnitt 2.5 ausführlich beschrieben und werden an dieser Stelle nur kurz genannt:

Spalte 3A: $P(A_{SuV}) \geq 80 \%$,

Spalte 3B: $20 \% < P(A_{SuV}) < 80 \%$,

Spalte 3C: $P(A_{SuV}) \leq 20 \%$.

Die final berechneten Anwendungsgrade $P(A_{SuV})$ bzw. $P(A_V)$ für Behälterglas sind in Tabelle 19 dargestellt. Zudem gibt Tabelle 19 einen Hinweis auf die Zuordnung der Fraktionen im Anhang 1 des Mindeststandard 2022. Im Hinblick auf den Mindeststandard 2023 ist die Aufteilung der Spalte 3 in Diskussion. Die Konsultationsfassung für den Mindeststandard 2023 sieht die Zusammenlegung der Spalten 3B und 3C mit Erfordernis von Einzelnachweisen vor. Die Grenze zwischen Spalte 3A und zukünftiger Spalte 3B soll gemäß Konsultationsfassung des Mindeststandards 2023 bei $P(A_{SuV}) \geq 80 \%$ liegen (ZSVR, 2023a). In Tabelle 19 wird zunächst weiterhin von 3 Spalten ausgegangen, auch um eine Vergleichbarkeit mit den Ergebnissen des vorherigen Betrachtungszeitraumes zu ermöglichen. Wir empfehlen anhand unserer Ergebnisse, im Anhang 1 des Mindeststandards 2023 gegenüber 2022 keine Änderungen für Fraktionen vorzunehmen (symbolisiert durch „=“ in Spalte 3).

Tabelle 19: Anwendungsgrade in Bezug zu Anhang 1 des Mindeststandards 2022

Verpackungen und Fraktionen-Cluster	$P(A_{SuV})$ in % ²²	Spalte in Anhang 1 Mindeststandard
Behälterglas: 100, 101, 102, 103, 104, 105	100	3A (=)
Weißblechverpackungen, Weißblechverbunde: 410, 412	100	3A (=)
Aluminiumverpackungen, Aluminiumverbunde, aluminiumfolienhaltige Verbundverpackungen: 420	100	3A (=)
PPK-Verpackungen aus dem Blauen System	99,0	3A (=)
FKN: 510, 512	99,6	3A (=)

²² Mit Bezug zu prognostizierten LVP-Mengen 2022 und der Verwertungszuführungsmenge gemäß MSN 2021.

Verpackungen und Fraktionen-Cluster	P(A _{SUV}) in % ²²	Spalte in Anhang 1 Mindeststandard
Kunststoffhohlkörper > 5 Liter (aus PE oder PP): 322, (324-X), (329-X), (323), (351-X)	93,3	3A (=)
PE, formstabile und halbstarre Kunststoffverpackungen ≤ 5 Liter: 329-X, (323), (351-X)	91,8	3A (=)
PP, formstabile und halbstarre Kunststoffverpackungen ≤ 5 Liter: 324-X, (323), (351-X)	88,3	3A (=)
PET-Flaschen, transparent aus PET-A: 325, (328-0), (328-1), (328-2), (328-3) (Unter und Obergrenze (Worst Case und Best Case) entspricht dem Minimum und Maximum aller Kombinationen an sonstigen formstabilen PET Verpackungen in den Fraktionen gemäß Spezifikationen) ohne Pfand	81,8 – 85,2	3A (=)
Kunststofffolien: 310, 310-1	80,8	3A (=)
PS, formstabile und halbstarre Kunststoffverpackungen: 331, (351-X)	66,8	3B (=)
PE, flexible kleinformatische Kunststoffverpackungen: 323-2, (323), (310)	51,4	3B (=)
PP, flexible kleinformatische Kunststoffverpackungen: 323-2, (323), 324-2	32,0	3B (=)
PPK aus LVP: 550	25,5 – 66,8	3B (=)
Sonstige formstabile PET-Verpackungen aus PET-A: 328-5, 328-6, (328-0), (328-1), (328-2), (328-3) (Unter und Obergrenze (Worst Case und Best Case) entspricht dem Minimum und Maximum aller Kombinationen an sonstigen formstabilen PET Verpackungen in den Fraktionen gemäß Spezifikationen)	1,1 – 30,1	3C (=) (Erklärung zur Zuordnung im Text)
EPS: 340	0	3C (=)

Quelle: Tabelle basierend auf Grummt (2022) und der aktuellen Erhebung, auf methodischer Grundlage von Dehoust et al. (2021); Erläuterung der Symbole in der 3. Spalte gegenüber den Angaben im Anhang 1 des Mindeststandards 2022:

↓ : Verschlechterung; ↑ : Verbesserung; = : keine Änderung

Für Behälterglas, sowie Verpackungen aus Weißblech/Weißblechverbunden oder Aluminium/Aluminiumverbunden liegen die finalen Anwendungsgrade bei 100 %. Für PPK aus dem Blauen System, Kunststoffhohlkörper aus PE und PP > 5 Liter, formstabilen und halbstarren Verpackungen aus PP, PE sowie FKN liegt P(A_{SUV}) zwischen 88 % und ≈ 100 %. ReCarton gab an, dass über den Jahreswechsel Mengen an FKN energetisch verwertet werden mussten. Grund

dafür war die Gaspreiskrise. Der FKN-Verwerter Delkeskamp stellte die Produktion in 2022 ein (Delkeskamp, 2022; EUWID Verpackung, 2023). Gemäß ReCarton bestehe derzeit wieder eine Verwertungssicherheit für 100 % der Mengen. Mittelfristig gebe es in Deutschland wieder Überkapazitäten. Es gebe zudem Bestrebungen, weitere Kapazitäten für FKN aufzubauen (E-Mail von ReCarton am 15.03.2023). Daraus folgt eine Zuordnung der eben genannten Fraktionen in Spalte 3A im Anhang 1 des Mindeststandards.

Des Weiteren können Kunststofffolien (310, 310-1) weiterhin in Spalte 3A verbleiben, da der Anwendungsgrad knapp über 80 % liegt. $P(A_{SuV})$ für PS liegt bei 67 % und hat gegenüber 2020 um 5 Prozentpunkte zugenommen (2020: 62,2 %). PS wird damit weiterhin Spalte 3B zugeordnet. $P(A_{SuV})$ für flexible Kunststoffverpackungen aus PP beträgt 32 % und verbleibt damit ebenso in Spalte 3B. Erstmals wurde hier auch die Fraktion 324-2 (PP-flex) mit einbezogen. In Spalte 3B verbleiben ebenfalls flexible PE-Verpackungen. $P(A_{SuV})$ liegt hierbei bei 51,4 %. Da dabei auch die Fraktionen 310/310-1 einbezogen wurden, liegt $P(A_{SuV})$ für flexible kleinformatige PE-Verpackungen etwas höher als für kleinformatige flexible PP-Verpackungen.

Für transparente PET-Flaschen und sonstige formstabile PET-Verpackungen wurde eine Spannweite zwischen Worst Case und Best Case berechnet (siehe Abschnitte 2.2 und 3.6). Die Spannweite für $P(A_{SuV})$ für transparente PET-Flaschen liegt über 80 % (81,8 % – 85,2 %). Transparente PET-Flaschen werden damit weiterhin Spalte 3A zugeordnet. Gegenüber dem letzten Teilbericht konnte die Datenbasis für PET-Flaschen verbessert werden.

Die Spannweite $P(A_{SuV})$ für sonstige formstabile PET-Verpackungen (insbesondere PET-Schalen) liegt bei 1,1 % – 30,1 %. Aufgrund der folgenden Einschränkungen ist der Best Case unplausibel und wir empfehlen, sonstige PET-Verpackungen weiterhin in Spalte 3C zu belassen:

- Der Best Case mit $P(A_{SuV})$ 30,1 % ist nur erreichbar in einer speziellen Kombination von Anteilen an sonstigen PET-Verpackungen in den PET-Fraktionen 328-(0-6). Alle anderen Kombinationen liegen unterhalb dieser Prozentzahl. Die Misch-PET-Fraktionen zielen i. d. R. auf PET Flaschen und nicht auf sonst. formstabile PET Verpackungen ab. Würde man davon ausgehen, dass sonstige formstabile PET-Verpackungen nur in den Fraktionen 328-5 und -6 hochwertig werkstofflich verwertet werden, wäre $P(A_{SuV})$ im unteren Bereich der Spannweite.
- Einige Sortieranlagen gaben an, dass die Fraktion 328-5 teils werkstofflich und teils energetisch verwertet wird. Die von diesen Anlagen generierten Sortierfraktionen wurden trotzdem mangels Detailkenntnis über die Anteile vollständig als ‚für eine werkstoffliche Verwertung bereitgestellt‘ gewertet.
- Die Obergrenze der genannten Spannweite setzt voraus, dass sowohl Mono- als auch Multilayer-Schalen hochwertig werkstofflich verwertet werden. Die Einbeziehung von Multilayer-Schalen für alle PET-Verwerter ist unplausibel, denn einige der befragten PET-Verwerter gaben an, Multilayer-PET-Schalen vorab auszusortieren (siehe Abschnitt 3.6.6).

Uns sind aktuelle Bestrebungen bekannt, die Kapazitäten für ein hochwertiges werkstoffliches Recycling von PET-Schalen aus Deutschland auszubauen (E-Mail von Hr. Dr. Christiani am 25.04.2023). Wir empfehlen die aktuellen Entwicklungen in diesem Bereich weiterhin zu beobachten.

Für EPS besteht, wenn über das gelbe System erfasst, kein Sortier- und Recyclingpfad. $P(A_S)$ und damit auch $P(A_{SuV})$ für EPS beträgt aktuell 0 %. Derzeit laufen Pilotprojekte zur Sortierung und Bereitstellung von EPS in LVP-Sortieranlagen. Bei einem Einbezug der Pilotprojekte beliefe sich $P(A_S)$ auf < 5 %. Folglich sollte EPS weiterhin in Spalte 3C verbleiben.

Die Fraktion PPK aus LVP wird von einigen Papierfabriken gemeinsam mit besseren Altpapiersorten (sogenannte „Rezeptur“) verarbeitet. Aufgrund der Schließung des großen PPK- aus LVP-Verwerter Delkeskamp im Jahr 2022 wurde für diese Fraktion eine Spannweite berechnet. Die Untergrenze 25,5 % betrachtet das Szenario unter der Prämisse, dass die Mengen, die bisher zu Delkeskamp gingen, aktuell keiner hochwertigen werkstofflichen Verwertung zugeführt werden. Die Obergrenze 66,8 % umfasst das Szenario, dass die Mengen, die bisher zu Delkeskamp gingen, weiterhin einer hochwertigen werkstofflichen Verwertung zugeführt werden. Einige LVP-Sortieranlagen gaben an, dass diese Fraktion nur teilweise einem Recycling zugeführt wird. Diese Anlagen wurden trotzdem in die Berechnung einbezogen. Aufgrund der berechneten Spannweite des $P(A_{\text{suV}})$ verbleibt die Fraktion PPK aus LVP weiterhin in Spalte 3B.

Die Fraktion PPK aus LVP weist gemäß verschiedener Anlagenbetreiber einen hohen Verschmutzungsgrad durch Füllgutanhaftungen, hohe Kunststoffanteile und einen hohen Wassergehalt auf, welche ein Recycling erschweren können und zu einer geringen Faserausbeute führen. Füllgutanhaftungen können zur Geruchsbildung und ggf. Schimmel- oder Schädlingsbefall führen. Die Ballen können i. d. R. nur eine begrenzte Zeit gelagert werden und das Prozesswasser muss entsprechend aufbereitet werden. Im Konsultationsentwurf des Mindeststandards 2023 ist ein Einzelnachweis für faserbasierte Verbundverpackungen und PPK-Verpackungen mit nicht-trockenen Füllgütern (außer FKN) vorgesehen. Für faserbasierte Verpackungen, die typischerweise mit trockenen (Wassergehalt < 15 %), rieselfähigen oder stückigen Füllgütern (Bsp. Mehl, Zucker, etc.) befüllt werden, gilt eine Ausnahme von der Nachweispflicht (ZSVR, 2023a). Insbesondere für nicht-trockene Füllgüter werden beispielsweise Nassfestmittel oder Beschichtungen verwendet, um einen ausreichenden Produktschutz zu gewährleisten. Diese Kombinationen können ein Recycling der Verpackung erschweren.

Für Verpackungen aus PVC, PA, PLA, PU, PC, kompostierbaren Kunststoffen, Keramik (Steingut), Jute, Textilien sowie Kork als Verpackungskomponente und anderen eben nicht genannten Kunststoffen bestehen derzeit keine hochwertigen werkstofflichen Verwertungspfade (Schüler & Wilhelm, 2023). Bisher sind „biologisch abbaubare Kunststoffe“ und „Naturmaterialien wie Holz“ in der Einleitung des Anhang 1 als nicht recyclingfähige Verpackungen und Werkstoffe genannt (ZSVR, 2022). Es wird empfohlen, an dieser Stelle noch weitere eben genannte Beispiele zu nennen. In der Konsultationsfassung des Mindeststandards 2023 sind die beiden eben genannten Beispiele für nicht recyclingfähige Verpackungen zusätzlich unter Abschnitt 4.1 genannt (ZSVR, 2023a).

4.2 Sortier- und Trennbarkeit sowie Recyclingunverträglichkeiten

Aus der Einschätzung der Sortierer und Verwerter zu problematischen Verpackungen und Verpackungsbestandteilen bei der Trennung, Sortierung und Verwertung lassen sich Erkenntnisse für zukünftige Mindeststandards ableiten. Es ist festzustellen, dass die Sortierer und Verwerter überwiegend die im Anhang 2 und Anhang 3 des Mindeststandards angegebenen Kriterien bestätigten. Einige der von den Sortierern und Verwertern genannten zusätzlichen Angaben, wurden bereits in den EK III eingebracht und werden an dieser Stelle nicht wiederholt genannt. An dieser Stelle sei deshalb auf den Teilbericht 1 verwiesen. Zwei weitere von den Anlagenbetreibern als kritisch eingestufte Verpackungsmerkmale sollten im EK III beraten werden (Punkte sind inzwischen eingebracht):

- In der Konsultationsversion des Mindeststandards 2023 sind „Nitrozellulose-basierte Druckfarben im Zwischenlagendruck“ im Anhang 3 als Recyclingunverträglichkeit

aufgenommen (ZSVR, 2023a, 2023b). Es wird empfohlen, eine Aufnahme weiterer Druckfarbenbestandteile in den Mindeststandard im EK III zu prüfen.

- ▶ In der Konsultationsversion des Mindeststandards 2023 ist bereits „ohne Lichtbarriere“ bei „Fullsleeve-Etikettierung (Ausnahme: Fullsleeves ohne Lichtbarriere von PET-Hohlkörpern“ im Anhang 2 ergänzt. Wir empfehlen, die Aufnahme von „Lichtschutz-Sleeves (innen schwarz)“ für weitere Verpackungsarten sowie „Sleeves mit Alu-Bedampfung“ in den Mindeststandard im EK III zu prüfen.
- ▶ Die qualitative Verschlechterung der Fraktion PPK aus LVP und zunehmende Substitution von Kunststoffverpackungen durch faserbasierte Lösungen ist bereits Diskussionsthema im EK III.
- ▶ Es wird empfohlen, die Problematik „Runde rollende Verpackungskörper“ in der kommenden Saison in den EK III einzubringen. Die Verpackungskörper kommen laut der Anlagenbetreiber später auf den Förderbändern zum Liegen, was dazu führen kann, dass die NIR-Trenner runde Körper zwar erkennen, aber aufgrund der geänderten Position (im Vergleich zur Detektion) nicht korrekt mittels Druckluft ausschleusen können.

4.3 Zusammenfassung Stand der Praxis der Kunststoffverwertung

In Hinblick auf Anhang 2 und Anhang 3 des Mindeststandards stellt Tabelle 20 eine zusammenfassende Übersicht über den Stand der Praxis der Kunststoffverwertung anhand der durchgeführten Befragung dar. Detaillierte Beschreibungen zur Praxis sind im Kapitel 3 dargestellt. Ein Kreuz in Klammern (X) zeigt, dass nur einzelne Anlagen dieses Verfahren im Erhebungsbogen angegeben haben und die Mengenrelevanz dieser Verwertungsprozessvarianten gering ist. Für PET-Flaschen können alle Prozesse (außer lösemittelbasierte Verfahren) als Stand der Technik und generelle Praxis eingestuft werden. Die meisten PET-Verwerter gaben Mahlgut als Endprodukt an. Weitere nachfolgende Schritte (Extrusion und Solid State Polymerisation) finden meist in anderen nachfolgenden Anlagen statt.

Zerkleinerung, Kaltwäsche, Schwimm-Sink-Trennung sowie Extrusion mit Schmelzefiltration können in den Referenzanlagen für die Verwertung der anderen Kunststoffverpackungen vorausgesetzt werden. Einige Verwerter von Kunststofffolien sortieren PP-Folien vor, um eine höhere Reinheit an LDPE-Folien zu generieren. Einige Nicht-PET-Kunststoffverwertungsanlagen machten die Angabe, eine Vorsortierung auf Verpackungsebene oder eine Mahlgut-Nachsortierung durchzuführen. Aus einem Expertengespräch geht hervor, dass auch bereits Vakuumextraktion für Nicht-PET-Kunststoffverwertungsanlagen im Einsatz ist, um schwer flüchtige hochmolekulare Substanzen aus dem Regranulat zu entfernen (Gespräch mit Hr. Dr. Christiani am 27.03.2023).

Für transparente PET-Flaschen ist weiterhin die Heißwäsche als Referenzprozess zur Identifizierung von Recyclingunverträglichkeiten (beispielsweise Klebstoffe von Etiketten) anzusehen. Die Heißwäsche wird gleichzeitig als Stand der Technik für PET eingeordnet. Für die anderen Kunststoffverpackungen kann derzeit keine Heißwäsche vorausgesetzt werden, da bisher nur wenige Anlagen angaben, das Mahlgut heiß zu waschen. Lösemittelbasierte Verfahren werden bei den befragten Kunststoffrecyclinganlagen aktuell nicht im industriellen Maßstab für Systemmengen angewendet.

Tabelle 20: Stand der Praxis der Verwertung von Kunststoffen aus den Ergebnissen der Erhebungsbögen²³

Verfahren	Funktion	Stand der Praxis in Verwertungsprozessen aus den Ergebnissen der Erhebungsbögen				
		PET	PE	PP	PS	LDPE/ Folien
Sensorbasierte Vorsortierung nach Kunststoffart oder Farbe	Abtrennung von Fremdkunststoffen, Verbesserung der Eigenschaften des Endproduktes oder Erhöhung des Einsatzspektrums, Einsatz des Rezyklats in farbsensiblen Anwendungen	X	(X)	(X)		(X)
Zerkleinerung	Zerkleinerung zu Mahlgut, Vorbereitung zur Granulierung	X	X	X	X	X
Kaltwäsche	Reinigung der Oberfläche	X	X	X	X	X
Heißwäsche (ggf. unter Zugabe von Natronlauge und Detergenzien)	Reinigung der Oberfläche, Geruchsminderung	X	(X)	(X)		(X)
Schwimm-Sink-Trennung	Separation von Mahlgut aus Fremdkunststoffen	X	X	X	X	X
Trocknung (mechanisch und/oder thermisch)	Entfernung von Feuchtigkeit, Vorbereitung für Extrusion	X	X	X	X	X
Mahlgut-Nachsortierung	Nachsortierung (meist nach Farbe)	X	(X)	(X)		(X)
Extrusion mit Schmelzefiltration	Umschmelzen	X	X	X	X	X
Vakuumextraktion		X	(X)	(X)		
Solid State Polymerisation (SSP)	Einstellung Kristallisations- und Polymerisationsgrad	X				
Lösemittelbasierte Verfahren	Fraktionierung auf Polymerebene					

Quelle: Tabelle basierend auf Grummt (2022) und der aktuellen Erhebung; Idee zur Tabelle basierend auf Christiani: „Wie können wir die Qualität von Kunststoffrezyklaten durch D4R, Sortierung und Aufbereitung steigern?“, Präsentation, 04.03.2021

²³ (X) = nur wenige Anlagen setzen das Verfahren ein.

4.4 Zusammenfassung Rezyklatanwendungen der Verwerter

Abbildung 42 fasst die von den Verwertungsanlagen genannten Rezyklatanwendung zusammen. Die fett formatierten Anwendungen haben dabei die größte Mengenrelevanz. Es ist geplant, bei der kommenden Erhebung die prozentuale Verteilung auf die Rezyklatanwendungen mit abzufragen, um die Mengenverteilung besser darstellen zu können. Insbesondere die Rezyklatanwendungen im Folienbereich sollten weiter beobachtet werden. Sollte sich herausstellen, dass Blasfolienanwendungen an Mengenrelevanz gewinnen, müsste dies in EK III eingebracht werden. Im Zuge dessen müsste der Einfluss von PP-Folien auf die Qualität der LDPE-Rezyklate für Blasfolienanwendungen im Mindeststandard diskutiert werden. (Dehoust et al., 2021).

Abbildung 42: Rezyklatanwendungen der Referenzanlagen (Bezugsjahre 2021/2022)

Behälterglas	Behälterglas, Feinkorn: Glasschaum oder-wolle
PP, MPO, PO-flex	Spritzguss, Extrusionsfolien/Thermoforms, Blasformen
PE	Spritzguss, Extrusionsfolien/Thermoforms, Blasformen
PS	Spritzguss
PET (ohne Pfand)	PET-Folien, Polyesterfasern, Umreifungsbänder, PET-Preforms
Folien (LDPE)	Spritzguss, Extrusions- und Blasfolien
PPK (Blaues System)	Wellpappenrohapiere, Karton und Pappe, Hygienepapiere, sonstige Papiere
PPK aus LVP	Wellpappenrohapiere, Karton und Pappe (je nach Szenario)
FKN	Wellpappenrohapiere, Hygienepapiere, Karton und Pappe
Aluminium	Aluminiumgusslegierungen, Gießereihilfsmittel, Feuerwerkskörper, Automobilindustrie, Verpackungen
Weißblech	Baustahlprodukte, Gussanwendungen in Gießereien, Automobilindustrie, Verpackungen

Quelle: eigene Darstellung, Umweltbundesamt

5 Quellenverzeichnis

- ALBA Group plc & Co. KG. (2019). Der Zen-Roboter aus Leipzig. Abgerufen am 29.07.2022. <https://inside.albagroup.de/der-zen-roboter-aus-leipzig/>
- AP Concept GmbH & Co. KG. (o. J.). Altpapiersortieranlage nach neuesten Standards. Abgerufen am 15.05.2023. <https://www.ap-concept.de/altpapier/>
- AVR UmweltService GmbH. (o. J.). Wertstoffe – Die Grüne Tonne plus. Abgerufen am 15.05.2023. <https://www.avr-kommunal.de/leistungen/wertstoffe>
- BfR Bundesinstitut für Risikobewertung. (2023, 01.02.). XXXVI. Papiere, Kartons und Pappen für den Lebensmittelkontakt. Abgerufen am 20.06.2023. <https://www.bfr.bund.de/cm/343/XXXVI-Papiere--Kartons-und-Pappen-fuer-den-Lebensmittelkontakt.pdf>
- Bilitewski, B., & Härdtle, G. (2013). Abfallwirtschaft (4. Aufl.). Heidelberg. Springer-Verlag Berlin.
- Blehschmidt, J. (2011). Altpapier: Regularien – Erfassung – Aufbereitung – Maschinen und Anlagen – Umweltschutz. 1. Auflage. München, Wien. Carl-Hanser-Verlag GmbH & Co. KG.
- Bothe, D. (2015). Mengenstromnachweis der Dualen Systeme – Analysen und Ergebnisse. Müll und Abfall. Ausgabe 12/2015. Abgerufen am 20.06.2023. <https://doi.org/10.37307/j.1863-9763.2015.12.06>
- Brunn, M. (2017). Die Roboter kommen langsam. ATEC Business Information GmbH (Hrsg.), Recycling Almanach 2017. München.
- Bulach, W., Dehoust, G., Mayer, F., & Möck, A. (2022). Ökobilanz zu den Leistungen der dualen Systeme im Bereich des Verpackungsrecyclings. Berlin/Darmstadt. Ökoinstitut e.V. Bericht. oeko.de/fileadmin/oekodoc/Duale_Systeme_Oekobilanz_Endbericht.pdf
- Bünemann, A., Christiani, J., Kerkhoff, M., & Koch, S. (2016). Folgenabschätzung einer Ausweitung der Pfandpflicht für Saft-Einwegverpackungen auf das PET-Recycling. Aachen. Institut cyclos-HTP GmbH. Bericht. <https://www.htp.eu/publikationen/>
- BV Glas, BDE & bvse. (2014). Leitlinie „Qualitätsanforderungen an Glasscherben zum Einsatz in der Behälterglasindustrie“ – Standardblatt T120.
- bvse. (2021). Palurec-Anlage zur Verwertung der Kunststoff-Aluminium-Anteile geht in Betrieb. Abgerufen am 22.06.2022. <https://www.bvse.de/recycling/recycling-nachrichten/7161-palurec-anlage-zur-verwertung-der-kunststoff-aluminium-anteile-geht-in-betrieb.html>
- Christiani, J. (2021). Wie können wir die Qualität von Kunststoffrezyklaten durch D4R, Sortierung und Aufbereitung steigern? Optionen und Notwendigkeiten. Der Grüne Punkt „Closed Loop-Design – Keine Angst vor Rezyklaten“. Präsentation. Abgerufen am 20.06.2023. <https://www.cyclos-htp.de/publications/studies-papers/>
- Christiani, J., & Beckamp, S. (2020). Was können die mechanische Aufbereitung von Kunststoffen und das werkstoffliche Recycling leisten? Energie aus Abfall. Band 17. Neuruppin. Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH.
- Dehoust, G., Germann, A., Christiani, J., Bartnik, S., Beckamp, S., & Bünemann, A. (2021). Ermittlung der Praxis der Sortierung und Verwertung von Verpackungen im Sinne des § 21 VerpackG. UBA-TEXTE 11/2021. Dessau-Roßlau. Umweltbundesamt. Abgerufen am 20.06.2023. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/ermittlung-der-praxis-der-sortierung-verwertung-von>
- Delkeskamp, S. (2022, 29.07.). Delkeskamp schließt Papierfabrik Nortrup. Abgerufen am 26.04.2023. <https://www.delkeskamp.de/news/delkeskamp-schliesst-papierfabrik-nortrup.html>
- Der Grüne Punkt - Duales System Deutschland GmbH. (2004, Dezember). Produktspezifikation Fraktions-Nr. 328-0.

Der Grüne Punkt - Duales System Deutschland GmbH. (2014, August). Produktspezifikation 08/2024 Fraktions-Nr. 328-3 Misch-PET 50/50.

Der Grüne Punkt - Duales System Deutschland GmbH. (2019, Dezember). Product Specification 12/2019 Fraction-No. 328-6 PET-Trays.

Der Grüne Punkt - Duales System Deutschland GmbH. (2020, August). Produktspezifikation 8/2020 Flüssigkeitskartons/Getränkekartons. Gültig ab 01.01.2021. Abgerufen am 09.06.2023.

https://www.getraenkekarton.de/wp-content/uploads/2021/04/20200827_spezifikation_512.pdf

Der Grüne Punkt - Duales System Deutschland GmbH. (2023a). Downloads. Abgerufen am 09.06.2023.

Downloads—Spezifikationen. <https://www.gruener-punkt.de/de/downloads>

Der Grüne Punkt - Duales System Deutschland GmbH. (2023b, 06.04.). Rohstofffraktionsspezifikation 325 PET-Flaschen. Abgerufen am 09.06.2023. [https://www.gruener-](https://www.gruener-punkt.de/fileadmin/Dateien/Downloads/PDFs/Rohstofffraktionsspezifikationen2023/DOC-23-50740_-_Rohstofffraktionsspezifikation_325_PET-Flaschen_-_v0.01.0007.pdf)

[punkt.de/fileadmin/Dateien/Downloads/PDFs/Rohstofffraktionsspezifikationen2023/DOC-23-50740 - Rohstofffraktionsspezifikation 325 PET-Flaschen - v0.01.0007.pdf](https://www.gruener-punkt.de/fileadmin/Dateien/Downloads/PDFs/Rohstofffraktionsspezifikationen2023/DOC-23-50740_-_Rohstofffraktionsspezifikation_325_PET-Flaschen_-_v0.01.0007.pdf)

Der Grüne Punkt - Duales System Deutschland GmbH. (2023c, 06.04). Rohstofffraktionsspezifikation 328-1 Misch-PET 90-10. Abgerufen am 09.06.2023. [https://www.gruener-](https://www.gruener-punkt.de/fileadmin/Dateien/Downloads/PDFs/Rohstofffraktionsspezifikationen2023/DOC-23-50741_-_Rohstofffraktionsspezifikation_328-1_Misch-PET_90-10_-_v0.01.0004.pdf)

[punkt.de/fileadmin/Dateien/Downloads/PDFs/Rohstofffraktionsspezifikationen2023/DOC-23-50741 - Rohstofffraktionsspezifikation 328-1 Misch-PET 90-10 - v0.01.0004.pdf](https://www.gruener-punkt.de/fileadmin/Dateien/Downloads/PDFs/Rohstofffraktionsspezifikationen2023/DOC-23-50741_-_Rohstofffraktionsspezifikation_328-1_Misch-PET_90-10_-_v0.01.0004.pdf)

Der Grüne Punkt - Duales System Deutschland GmbH. (2023d, 06.04.). Rohstofffraktionsspezifikation 328-2 Misch-PET 70-30. Abgerufen am 09.06.2023. [https://www.gruener-](https://www.gruener-punkt.de/fileadmin/Dateien/Downloads/PDFs/Rohstofffraktionsspezifikationen2023/DOC-23-50741_-_Rohstofffraktionsspezifikation_328-1_Misch-PET_90-10_-_v0.01.0004.pdf)

[punkt.de/fileadmin/Dateien/Downloads/PDFs/Rohstofffraktionsspezifikationen2023/DOC-23-50741 - Rohstofffraktionsspezifikation 328-1 Misch-PET 90-10 - v0.01.0004.pdf](https://www.gruener-punkt.de/fileadmin/Dateien/Downloads/PDFs/Rohstofffraktionsspezifikationen2023/DOC-23-50741_-_Rohstofffraktionsspezifikation_328-1_Misch-PET_90-10_-_v0.01.0004.pdf)

Der Grüne Punkt - Duales System Deutschland GmbH. (2023e, 06.04.). Rohstofffraktionsspezifikation 328-5 PET-Schalen. Abgerufen am 09.06.2023. [https://www.gruener-](https://www.gruener-punkt.de/fileadmin/Dateien/Downloads/PDFs/Rohstofffraktionsspezifikationen2023/DOC-23-50740_-_Rohstofffraktionsspezifikation_325_PET-Flaschen_-_v0.01.0007.pdf)

[punkt.de/fileadmin/Dateien/Downloads/PDFs/Rohstofffraktionsspezifikationen2023/DOC-23-50740 - Rohstofffraktionsspezifikation 325 PET-Flaschen - v0.01.0007.pdf](https://www.gruener-punkt.de/fileadmin/Dateien/Downloads/PDFs/Rohstofffraktionsspezifikationen2023/DOC-23-50740_-_Rohstofffraktionsspezifikation_325_PET-Flaschen_-_v0.01.0007.pdf)

DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (2014). Papier, Karton und Pappe – Europäische Liste der Altpapier-Standardsorten; Deutsche Fassung EN 643:2014. Beuth Verlag GmbH.

EuPIA. (2021, 29.01.). Printing inks and Plastic Recycling – Q & A. Brüssel. Abgerufen am 20.06.2023.

[https://www.eupia.org/wp-content/uploads/2022/09/Printing inks and Plastic Recycling - Q A.pdf](https://www.eupia.org/wp-content/uploads/2022/09/Printing_inks_and_Plastic_Recycling_-_Q_A.pdf)

European Commission (2022a, 30.11.). Proposal for a REGULATION OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL – on packaging and packaging waste, amending Regulation (EU) 2019/1020 and Directive (EU) 2019/904, and repealing Directive 94/62/EC. COM(2022) 677 final.

European Commission (2022b, Oktober). Proposal for a REGULATION OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL – on packaging and packaging waste, amending Regulation (EU) 2019/1020 and repealing Directive 94/62/EC (geleakte Fassung).

EUWID. (2021, 03.05.). Getränkekartons: Neue Palurec-Recyclinganlage nimmt offiziell den Betrieb auf.

Abgerufen am 22.06.2022. <https://www.euwid-verpackung.de/news/unternehmen/recycling-von-kunststoff-und-aluminiumresten-aus-getraenkekartons/>

EUWID Verpackung. (2023). Delkeskamp: Die Papierfabrik Nortrup wurde geschlossen und die Maschine bereits verkauft. Ausgabe 4.2023.

Fachbereich Umweltschutztechnik. (2019). VDI-Richtlinie 2095 – Blatt 3. Emissionsminderung – Abfallbehandlung – Anlagen zur Behandlung von Abfallgemischen aus der haushaltsnahen Wertstofferrfassung und von gemischten Gewerbeabfällen. Verein Deutscher Ingenieure e.V.

FKN. (2022, 08.10.). 2. Deutsche Recyclinganlage für PE-Alu aus Getränkekartons startet 2023. Abgerufen am 12.06.2023. <https://www.getraenkekarton.de/zweite-recyclinganlage-kunststoff-alu-aus-getraenkekartons/>

Friedl, C. (2022a). PET-Recycling: Einfach ätzend. Abgerufen am 17.05.2022. <https://www.ingenieur.de/technik/fachbereiche/werkstoffe/pet-recycling-einfach-aetzend/>

Friedl, C. (2022b). Zero Waste mit Ansage. RECYCLING magazin, Band 07, S. 26 – 27.

GDA. (2017). Aluminium in der Verpackung – Herstellung, Anwendung, Recycling. Düsseldorf. Gesamtverband der Aluminiumindustrie e.V. Abgerufen am 20.06.2023. <https://www.aluminiumdeutschland.de/wp-content/uploads/2022/11/GDA-Aluminium-in-der-Verpackung.pdf>

Grummt, S. (2022). Praxis der Sortierung und Verwertung von Verpackungen im Sinne des § 21 VerpackG 2020/2021. UBA-TEXTE 125/2022. Dessau-Roßlau. Umweltbundesamt. Abgerufen am 20.06. 2023. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/praxis-der-sortierung-verwertung-von-verpackungen>

Gürlich, U., Kladnik, V., & Pavlovic, K. (2022, September). Circular Packaging Design Guideline – Empfehlungen für recyclinggerechte Verpackungen. FH Campus Wien. Abgerufen am 20.06.2023. <https://www.fh-campuswien.ac.at/forschung/kompetenzzentren-fuer-forschung-und-entwicklung/kompetenzzentrum-fuer-sustainable-and-future-oriented-packaging-solutions/circular-packaging-design-guideline.html>

Hahn, R. (2020, 01.02.). Altglas: Auch Scherben müssen sterben. Frankfurter Allgemeine Zeitung (FAZ.NET). Abgerufen am 30.08.2022. <https://www.faz.net/aktuell/wissen/physik-mehr/glasrecycling-und-die-frage-wie-braun-gruenglas-sein-darf-16477454.html>

Hamidović, J. (1997). Industrielle Konzepte zum Altglasrecycling: Eine technisch-wirtschaftliche Analyse unter besonderer Berücksichtigung der Situation in Baden-Württemberg. Frankfurt am Main, New York. P. Lang.

Hanke, A. (2017, November). Moderne Konzepte für Altpapier-Sortieranlagen 4.0. Präsentation gehalten auf der DGAW Regionalveranstaltung Süd-West: „Technologischer Ressourcenschutz: Innovative Trenntechnologien für eine geschlossene Kreislaufführung“, Pfinztal. Abgerufen am 09.06.2023. https://www.dgaw.de/service/downloads?tx_news_pi1%5Baction%5D=detail&tx_news_pi1%5Bcontroller%5D=News&tx_news_pi1%5Bnews%5D=524&cHash=f40fff3f1651ea9e7a4f4bce1cd014a8

Hanke, A., & Tempel, L. (2014). Anlagenbau im Aufbereitungsbereich am Beispiel der Altpapiersortierung. In: Karl. J. Thomé-Kozmiensky & D. Goldmann, Recycling und Rohstoffe (Bd. 7). Neuruppin. TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky.

Heinen, M., & Bildstein, C. (2022). Glasrecycling. P. Kurth, A. Oexle, & M. Faulstich (Hrsg.), Praxishandbuch der Kreislauf- und Rohstoffwirtschaft (2. Auflage, S. 297 ff.). Wiesbaden. Springer Vieweg Wiesbaden.

IK Industrievereinigung Kunststoffverpackungen e.V. (2021). Positionspapier der IK Industrievereinigung Kunststoffverpackungen – Gegenwart und Ausblick: Recycling von PET-Schalen. Bad Homburg. Abgerufen am 02.08.2023. <https://newsroom.kunststoffverpackungen.de/wp-content/uploads/2021/08/ik-positionspapier-pet-schalen.pdf>

Institut cyclos-HTP GmbH. (2022). Prüfung und Testierung der Recyclingfähigkeit – Anforderungs- und Bewertungskatalog des Institutes cyclos-HTP zur EU-weiten Zertifizierung CHI-Standard. Fassung 5.1. Aachen. <https://www.cyclos-htp.de/publikationen/a-b-katalog/>

Kaeding-Koppers, A. (2023). PrintCYC liefert wichtigen Input für „Design for Recycling“-Richtlinien – Industrielle Forschung über den Einfluss von Druckfarben auf die Recyclingfähigkeit von Kunststoff-Folien. Flexo+Tief-Druck, 34. Jahrgang, S. 10-11.

Kauertz, B., & Detzel, A. (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. IFEU. Abgerufen am 20.06.2023.

https://www.nabu.de/imperia/md/content/nabude/veranstaltungen/171025-nabu-01b_studie_verwendung-und-recycling-pet-deutschland.pdf

Kitzberger, C. (2017). Geruchsbildung hoch zwei – Post-Consumer-Rezyklate zur Geruchsverbesserung aufbereiten. Kunststoffe. Carl Hanser Verlag, München, Band 6/2017.

Knappe, F., Reinhardt, J., Kauertz, B., Oetjen-Dehne, R., & Buschow, N. (2021). Technische Potenzialanalyse zur Steigerung des Kunststoffrecyclings und des Rezyklateinsatzes. UBA-TEXTE 92/2021. Dessau-Roßlau. Umweltbundesamt. Abgerufen am 20.06.2023. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/technische-potenzialanalyse-zur-steigerung-des>

Krone, K. (2000). Aluminiumrecycling: Vom Vorstoff bis zur fertigen Legierung (Vereinigung Deutscher Schmelzhütten e. V., Düsseldorf, Hrsg.). Düsseldorf. Aluminiumverlag.

KRS Recycling Systems GmbH. (o.J.). Separatoren – Separationstechnik für Glasrecyclinganlagen – SPEKTRUM SEPARATOR (Freifall System). Abgerufen am 25.07.2022. <https://www.recyclingsystems.de/wp/>

Lindner, C., Hein, J., & Fischer, E. (2019). Aufkommen, Abfallströme und Verwertung von EPS Verpackungsabfällen in Deutschland Bad Homburg. Conversio Market & Strategy GmbH. Präsentation. https://www.packform.de/fileadmin/packform/download/EPS-Abfallstroeme_in_D.pdf

Martens, H., & Goldmann, D. (2016). Recyclingtechnik. Fachbuch für Lehre und Praxis. Berlin, Heidelberg, New York. Springer-Verlag.

Mayer, F., Möck, A., Bulach, W., & Dehoust, G. (2022). Ökobilanz zu den Leistungen der dualen Systeme im Bereich des Verpackungsrecyclings. Müll und Abfall, Band 10, S. 546–554.

Mirosavljevic, S. (2021, 05.05.). TUBEX und PreZero Pyral geben Zusammenarbeit bekannt. Abgerufen 10.05.2023. <https://tubex.de/tubex-und-prezero-pyral-geben-zusammenarbeit-bekannt/>

Nüßler, D. (2016, Juni). Schwarze Kunststoffe sortenrein trennen. Forschung kompakt. Abgerufen am 20.06.2023. https://www.fraunhofer.de/content/dam/zv/de/presse-medien/2016/Juni/ForschungKompakt/fk_06_2016_FHR_IOSB_IAIS_Schwarze%20Kunststoffe%20sortenrein%20trennen.pdf

Palurec GmbH. (o. J.). Palurec GmbH – PE-Alu-Recycling gebrauchter Getränkekartons. Abgerufen 22.06.2022. <https://www.palurec.com/>

Pramer, J., & Huber, R. (2014). Neue Methoden zur Effizienzsteigerung von optischen Sortiergeräten am Beispiel der Glassortierung. Recycling und Rohstoffe. Band 7. S. 483–492. Neuruppin. TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky.

PreZero. (2022). PreZero nimmt Europas modernste Sortieranlage für Leichtverpackungen in Betrieb. Abgerufen am 28.07.2022. <https://prezero.de/presse/2022/prezero-nimmt-europas-modernste-sortieranlage-fuer-leichtverpackungen-in-betrieb>

PreZero Pyral. (o. J.). PreZero Pyral – Eigens entwickelte Systeme. Abgerufen am 10.05.2023. <https://www.prezero-pyral.com/eigens-entwickelte-systeme/>

Putz, H.-J., & Weinert, S. (2010). Qualitätseigenschaften der wichtigsten Altpapiersorten in Abhängigkeit von den Sortierbedingungen. Schlussbericht. Abgerufen am 12.06.2023. https://www.pmv.tu-darmstadt.de/media/fachgebiet_pmv/bibliothek_1/aif_veroeffentlichungen/AiF15408.pdf

Raatz, Seidel, Tuma, Thorenz, Helbig, Reller, & Faulstich. (2022). OptiMet – Ressourceneffizienzsteigerung in der Metallindustrie – Substitution von Primärrohstoffen durch optimiertes legierungsspezifisches Recycling. UBA-TEXTE 81/2022. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau. Abschlussbericht. Abgerufen am 20.06.2023. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/texte_81-2022_optimet.pdf

REDWAVE. (2019). REDWAVE XRF – Materialerkennung, -abscheidung und Qualitätskontrolle mittels Röntgen-Fluoreszenz-Spektrometer. Graz. Abgerufen am 20.06.2023.

https://redwave.com/fileadmin/user_upload/redwave/download/REDWAVE_Folder_XRF_DE.pdf

REDWAVE. (2022). REDWAVE CX – Leistungsstarke Farbsortierung und Störstoffabscheidung für Glasrecycling. Graz. Abgerufen am 20.06.2023.

https://redwave.com/fileadmin/user_upload/redwave/download/REDWAVE_Folder_CX_2022_DE.pdf

Reissner, A. (2021, Juli). PreZero-Pyral – 15 years of circular economy. Abgerufen am 20.06.2023.

https://www.reikan-group.com/wp-content/uploads/2021/07/Praesentation-Pyral_2021.pdf

Riebling, E. (2022). „Design for Recycling“ neues Element im EU-Verpackungsrecht. EUWID Recycling und Entsorgung, 43. Abgerufen am 02.06.2023. <https://www.euwid-recycling.de/news/politik/design-for-recycling-neues-element-im-eu-verpackungsrecht-251022/>

Sauter, A., Hochstädt, D., Seelig, J. H., Hansen, F., & Zeller, T. (2021). Grundsätzliche Ansätze zur Verbesserung der Ressourceneffizienz in der Metallindustrie. Chemie Ingenieur Technik. Band 93. Ausgabe 22. S. 1728–1741.

Schmitz, H. (2019). BMU-Umweltinnovationsprogramm. Abschlussbericht zum Vorhaben NKA3-003325 „Ressourcenschonung durch Steigerung der Sortiereffizienz bei der Aufbereitung von Verpackungsabfallgemischen“. Gernsheim. MEILO Gesellschaft zur Rückgewinnung sortierter Werkstoffe mbH & Co. KG. Abgerufen am 20.06.2023. https://www.umweltinnovationsprogramm.de/sites/default/files/2020-01/191125_abschlussbericht_meilo_final.pdf

Schneider, W. (2015). Wahrscheinlichkeiten. W. Schneider (Hrsg.), Mathematik für die berufliche Oberschule. Berlin, Heidelberg. Springer Spektrum.

Schüler, K., & Wilhelm, J. (2023). Ermittlung des Anteils hochgradig recyclingfähiger systembeteiligungspflichtiger Verpackungen auf dem deutschen Markt. UBA-TEXTE 78/2023. Dessau-Roßlau. Umweltbundesamt. Abgerufen am 20.06.2023. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11850/publikationen/78_2023_texte_ermittlung_des_anteils.pdf

Seifert, E. (2019, 01.06.). Aluminium-Recycling im Backofen. Abgerufen am 10.05.2023. Umwelt Magazin. <https://www.ingenieur.de/fachmedien/umweltmagazin/abfall-und-kreislauf/aluminium-recycling-im-backofen/>

Statistisches Bundesamt (Destatis). (2023, 13.06.). Tabelle „Aufkommen an Haushaltsabfällen: Deutschland, Jahre, Abfallarten“ in der Datenbank GENESIS-Online (32121). Abgerufen am 13.06.2023. <https://www-genesis.destatis.de/genesis/online?sequenz=tabelleErgebnis&selectionname=32121-0001&zeitscheiben=2#abreadcrumb>

Szombathy, M. (2021, 17.03.). Kunststoffrecycling: Geruchsreduktion wird zum unverzichtbaren Qualitätslevel. Abgerufen am 13.06.2023. <https://recyclingportal.eu/Archive/63918>

Thissen, K. (2022, 07.04.). Verfahrenstechnik aktuell. Intelligente LVP-Sortierung: Kooperation schafft Innovation. Abgerufen 20.06.2023. <https://www.recyclingnews.de/umweltservices/intelligente-lvp-sortierung-kooperation-schafft-innovation/>

Tschachtli, S., Pitschke, T., Kreibe, S., & Martin, A. (2019). Recyclingfähigkeit von Verpackungen – Konkretisierung Untersuchungsrahmen und Kriterienkatalog. Augsburg. bifa Umweltinstitut. Abgerufen am 20.06.2023. https://www.interzero.de/fileadmin/Verpackungsoptimierung/530592_Recyclingfaehigkeit_Bewertungskatalog_v6_3_Download.pdf

WGV Recycling GmbH. (o. J.). Papiersortierung. Abgerufen am 09.06.2023. <https://wgv-quarzbichl.de/unsere-anlagen/papiersortierung/>

Wünsch, J. (2021). Analyse der Auswirkungen der freiwilligen Einführung der Wertstofftonne durch öffentlich-rechtliche Entsorgungsträger bis zum Jahr 2018. Hochschule Magdeburg-Stendal, Magdeburg-Stendal. Masterarbeit.

ZSVR. (2020). Prüfleitlinien Mengenstromnachweis Systeme – zur Prüfung der Erfüllung der Nachweispflichten der Systeme im Rahmen des Mengenstromnachweises gemäß § 17 Absatz 2 VerpackG (im Einvernehmen mit dem Bundeskartellamt gemäß § 26 Absatz 1 Satz 2 Nummer 28 VerpackG).

ZSVR. (2021). Mindeststandard für die Bemessung der Recyclingfähigkeit von systembeteiligungspflichtigen Verpackungen gemäß § 21 Abs. 3 VerpackG. Osnabrück.

ZSVR. (2022). Mindeststandard für die Bemessung der Recyclingfähigkeit von systembeteiligungspflichtigen Verpackungen gemäß § 21 Abs. 3 VerpackG. Osnabrück. Abgerufen am 20.06.2023.

https://www.verpackungsregister.org/fileadmin/files/Mindeststandard/Mindeststandard_VerpackG_Ausgabe_2022.pdf

ZSVR. (2023a). Entwurf zur Konsultation 2023 – Mindeststandard für die Bemessung der Recyclingfähigkeit von systembeteiligungspflichtigen Verpackungen gemäß § 21 Abs. 3 VerpackG. Osnabrück. Abgerufen am 20.06.2023. <https://www.verpackungsregister.org/stiftung-behoerde/behoerdliches-handeln/konsultationsverfahren/mindeststandard>

ZSVR. (2023b). Die geplanten Änderungen im Mindeststandard 2023 – die Hintergründe. Abgerufen am 06.06.2023.

https://www.verpackungsregister.org/fileadmin/files/Mindeststandard/Mindeststandard_2023_Dokumentation_AEnderungen.pdf

A Erhebungsbögen

A.1 LVP-Sortieranlagen

A.1.1 Erhebungsbogen LVP-Sortieranlagen

Erhebungsbogen LVP-Sortierung

Bitte senden Sie den Erhebungsbogen ausgefüllt an:

Umweltbundesamt
z. Hd. III 1.6 – Frau Grummt
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau
E-Mail: svenja.grummt@uba.de

Absender
Name: _____
Adresse: _____
Tel./E-Mail: _____

1 Kapazität Ihrer LVP-Sortierung				
1.1 Die aktuelle technische Kapazität unter Berücksichtigung der genehmigungsrechtlichen Obergrenze beträgt:				
< 30.000 t/a	30.000 bis 60.000 t/a	60.000 bis 100.000 t/a	100.000 bis 150.000 t/a	> 150.000 t/a
☐	☐	☐	☐	☐
1.2 Die tatsächliche Verarbeitungsmenge für Systeme nach § 3 Abs. 16 VerpackG (gerundet auf 10.000 t/a) betrug ¹				
im Jahr 2022: t/a			Bemerkungen:	

¹ Wurde die Anlage in 2022 nicht mehr betrieben und ist eine Wiederaufnahme des Betriebes für Systemmengen nicht mehr abzusehen, tragen Sie bitte in Feld unter Punkt 1.2 eine 0 ein (auch wenn noch Übertragungsmengen aus 2021 aufbereitet wurden). Die Beantwortung der nachstehenden Fragen ist in diesem Fall entbehrlich.

2 Praktisch sortierbare Formate				
2.1 Bei welchem Trennschnitt bzw. bei welcher Maschinenweite erfolgt aktuell die Feinkornabtrennung mit dem Ziel der Störstoffabtrennung?				
20 mm ²	30 mm	40 – 60 mm	Sonstige	
☐	☐	☐	☐	
Sonstige bitte näher erläutern:				
2.2 Wird das Feinkorn vor der Ausschleusung als Sortierrest noch weiteren Prozessoperationen unterzogen? Wenn ja welchen?				
nein	Magnetscheidung	Wirbelstromscheidung	NIR	Sonstige
☐	☐	☐	☐	☐
Sonstige bitte näher erläutern:				

² inkl. Langlochmasche ca. 20 x 40 mm.

3 Sortierfraktionen und jeweils maßgeblicher Sortierprozess			
3.1 Welche Sortierfraktionen für ein Recycling wurden von Ihnen aktuell regelmäßig aussortiert und bereitgestellt?			
Fraktionsnummer	Bezeichnung	Ja, wird produziert und für ein Recycling bereitgestellt	Bemerkungen, ggf. weiter spezifizieren
310	Kunststoff-Folien	☐	
320	Gemischte Kunststoff-Flaschen	☐	
321	PO-Kunststoff-Flaschen	☐	
322	Kunststoff-Hohlkörper	☐	
323	Gemischte Polyolefin-Artikel (MPO)	☐	
323-2	Flexible PO-Artikel	☐	
324	Polypropylen	☐	
324-1	Polypropylen-plus	☐	
324-2	PP-Folie	☐	
325	PET-Flaschen transparent	☐	
328-1	Misch-PET (90/10)	☐	
328-2	Misch-PET (70/30)	☐	
328-3	Misch-PET (50/50)	☐	
328-5	PET-Schalen	☐	
328-6	PET-Schalen	☐	
329	Polyethylen	☐	
330	Becher	☐	
331	Polystyrol	☐	
340	Expandiertes Polystyrol	☐	
350	Mischkunststoffe	☐	
352	Mischkunststoffe Neu	☐	
351-1	Formstabile Kunststoffe Qualität 1	☐	
351-2	Formstabile Kunststoffe Qualität 2	☐	
351-3	Formstabile Kunststoffe Qualität 3	☐	
351-4	Formstabile Kunststoffe Qualität 4	☐	
351-5	Schwarze Kunststoffe	☐	
410/412	Weißblech, Weißblech Spez. 2014	☐	
420	Aluminium	☐	
510	Flüssigkeitskartons	☐	
512	Flüssigkeitskartons/Getränkekartons	☐	
550	PPK aus LVP	☐	

Sonstige bitte benennen:				
3.2 Welche Sortierverfahren wurden von Ihnen aktuell maßgeblich verwendet? ³				
Fraktionsnummer	Manuelle Sortierung	Mechanische Sortierung	Automatische Sortierung	Sonstige/Bemerkungen
310	☐	☐ Windsichtung	☐ NIR-Sortierung LDPE	☐
		☐ Ballistische Separation	☐ nur Großformate ☐ inkl. Kleinformate	
320	☐		☐ NIR-MKS	☐
321	☐		☐ NIR-MPO	☐
322	☐		☐ NIR-PE/PP	☐
323		☐ Windsichtung (nur Windsichterleichtgut, wenn als MPO bereitgestellt)	☐ NIR-MPO	☐
323-2		☐ Windsichtung (nur Windsichterleichtgut, wenn als MPO bereitgestellt)	☐ NIR-LDPE	☐
324			☐ NIR-KA	☐
324-1			☐ NIR-KA	☐
324-2			☐ NIR-PP	☐
325	☐		☐ NIR-MPO	☐
328-1			☐ NIR-PET + manuelle Sortierung	☐
328-2			☐ NIR-PET + manuelle Sortierung	☐
328-3			☐ NIR-PET + manuelle Sortierung	☐
328-5			☐ NIR-PET + manuelle Sortierung	☐
328-6			☐ NIR-PET + manuelle Sortierung	☐
329			☐ NIR-KA	☐
331			☐ NIR-KA	☐
340	☐			☐

³ Bitte geben Sie nur den für die Aussortierung entscheidenden Sortierprozess an: Bsp.: Bei einer Aussortierung über NIR mit manueller Kontrollsortierung geben sie bitte nur NIR an.

Bitte kreuzen Sie „manuelle Sortierung“ nur dann an, wenn das Sortierprodukt positiv manuell sortiert wird.

Bitte „Sonstige“ immer dann ankreuzen, wenn die vorgeschlagenen Ankreuzmöglichkeiten nicht zutreffen.

Fraktionsnummer	Manuelle Sortierung	Mechanische Sortierung	Automatische Sortierung	Sonstige/Bemerkungen
350			☐ NIR-MKS	☐
351 {1-4}			☐ NIR-MKS	☐
351-5	☐		☐ Black Scan	☐
352			☐ NIR-MK	☐
410/412		☐ Magnetscheidung		☐
420		☐ Wirbelstromscheidung		☐
510			☐ NIR-FKN	☐
512			☐ NIR-FKN	☐
550	☐		☐ NIR-PPK	☐

Sonstige bitte benennen:

4 Einschätzung zur Sortierbarkeit und Trennbarkeit

4.1 Welche Verpackungsmerkmale erschweren die Trennung und Sortierung in der sensorgestützten Sortierung?

Beschreibung		Problem unbekannt	Problem nicht gelöst, aber aufgrund geringer Mengenrelevanz bedeutungslos	Problem bekannt, technisch		kein Problem	Bemerkung
				weitgehend gelöst	nicht gelöst		
Kunststoffverpackungen	Großflächige Etikettierung (> 50 % der Oberfläche) mit Fremdmaterial	☐	☐	☐	☐	☐	
	Fullsleeve-Etikettierung ⁴	☐	☐	☐	☐	☐	
	Multilayer-Aufbau (außer PE- / PP-EVOH)	☐	☐	☐	☐	☐	
	Metallisierung (außer innwändig/in der Mittelschicht metallisiert)	☐	☐	☐	☐	☐	

^a Bitte geben Sie an unter welchen Umständen Fullsleeve-Etiketten Probleme bereiten (z. B. Materialkombinationen und Einfluss der Materialdicke).

Beschreibung		Problem unbekannt	Problem nicht gelöst, aber aufgrund geringer Mengenrelevanz bedeutungslos	Problem bekannt, technisch		kein Problem	Bemerkung
				weitgehend gelöst	nicht gelöst		
Kunststoffverpackungen	Dunkle Farbgestaltung unter Verwendung rußbasierter Pigmente (auch bei Verwendung in innenliegenden Layern)	☐	☐	☐	☐	☐	
	Unterschiedliche Kunststoffarten auf Vorder- und Rückseiten	☐	☐	☐	☐	☐	
	Großflächig (> 50 % der Oberfläche) aufgebrachte Metallpigmente (Lackierung, Beschichtung oder Prägung)	☐	☐	☐	☐	☐	
	Spezielle oder asymmetrische Verpackungsformen (ggf. Angabe problematischer Verpackungsformen)	☐	☐	☐	☐	☐	
PPK-Verpackungen und Verbunde auf PPK-Basis	Lackierte Oberfläche (außer klare Schutzlacke bis zu einer Lackstärke von ≤ 5 µm)	☐	☐	☐	☐	☐	
	Kunststoffbeschichtete Oberfläche	☐	☐	☐	☐	☐	
	Schwarz durchgefärbt unter Verwendung rußbasierter Pigmente	☐	☐	☐	☐	☐	
FKN	Vom Standardaufbau (nicht nassfest ausgerüsteter Karton, PE ± Alu) abweichende Ausführung	☐	☐	☐	☐	☐	
4.2 Gibt es sonstige kritische Verpackungsmerkmale (auch unter dem Aspekt, dass sie außerordentliche Kosten und/oder außerordentlichen technischen Aufwand verursachen können)?							
Beschreibung	Aufgrund geringer Mengenrelevanz derzeit nicht bedeutend	Problem bekannt, technisch		Erläuterung			
		weitgehend gelöst	nicht gelöst				
	☐	☐	☐				
	☐	☐	☐				
	☐	☐	☐				

A.1.2 Fragenkatalog LVP-Sortieranlagen

1. Wie hoch war die tatsächliche Verarbeitungsmenge für Systeme nach § 3 Abs. 16 VerpackG (gerundet auf 10.000 t/a) im Jahr 2022?
2. Wurden die folgenden Fraktionen in 2022 bzw. aktuell einem Recycling zugeführt?
Antwortmöglichkeiten: ja / nein / teilweise. Wenn „teilweise“ zu welchem Anteil wurden sie einem Recycling und zu welchem Anteil einer energetischen Verwertung zugeführt?
 - Fraktion 550 „PPK aus LVP“
 - Fraktion 328-5 „PET-Schalen“
 - Fraktion 328-6 „PET-Schalen“
 - Fraktion „PP-Folien“ (gemeint sind hier nicht PO-flex 323-2 oder Fraktion 310 oder 310-1). Welche Fraktionsnummer hat diese Fraktion?
3. Produzierte Ihre Anlage im Jahr 2022 neue Fraktionen, die einem Recycling zugeführt wurden, die 2021 noch nicht produziert wurden (z. B. Fraktion 340 EPS)?
4. Sind im Jahr 2022 von Ihnen produzierte Fraktionen, die zuvor einem Recycling zugeführt wurden, auf eine Zuführung zur energetischen Verwertung umgestellt worden?
5. Haben Sie in 2022 die Feinkornabsiebung umgestellt? Wenn ja, auf welche Maschenweite (Antwortmöglichkeiten: 20 mm, 30 mm oder 40 – 60 mm)? Haben Sie die Prozesstechnik, auf die der abgesiebte Sortierrest trifft, in 2022 umgestellt (Wirbelstromabscheidung, Magnetabscheidung, NIR)?
6. Gibt es kritische Verpackungsmerkmale oder Verpackungen, die eine Trennung oder Sortierung erschweren und die Sie uns gern mitteilen möchten (auch unter dem Aspekt, dass sie außerordentliche Kosten und/oder außerordentlichen technischen Aufwand verursachen können)?

A.2 Erhebungsbogen Kunststofffolien-Verwertung

Erhebungsbogen Verwertung von Kunststofffolien

Bitte senden Sie den Erhebungsbogen ausgefüllt an:

Umweltbundesamt
z. Hd. III 1.6 – Frau Grummt
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau
E-Mail: svenja.grummt@uba.de

Absender
Name: _____
Adresse: _____
Tel./E-Mail: _____

1 Kapazität Ihrer Verwertungsanlage				
Die aktuelle technische Kapazität unter Berücksichtigung der genehmigungsrechtlichen Obergrenze beträgt:				
< 5.000 t/a	5.000 bis 10.000 t/a	10.000 bis 15.000 t/a	15.000 bis 20.000 t/a	> 20.000 t/a
☐	☐	☐	☐	☐
2 Inputqualitäten und Produkte				
2.1 Endprodukte des Recyclingprozesses für Systemmengen aus Deutschland sind:				
gewaschenes Mahlgut	gewaschenes Agglomerat	Regranulat	Sonstige (z. B. Formteile)	
☐	☐	☐	☐	
Sonstige bitte näher erläutern:				
2.2 Werden im Recyclingprozess neben der Fraktion 310/310-1 auch noch weitere systemstämmige Qualitäten aus Deutschland eingesetzt?				
☐ ja				
☐ nein				
Wenn ja, welche (z.B. 323-2)?				
Fraktionsnummer	Separate Verarbeitung	Im Menü		
	☐	☐		
	☐	☐		
	☐	☐		

Erhebungsbogen Verwertung von Kunststofffolien

2.3 Die Endprodukte des Recyclingprozesses unter Einsatz von Systemmengen aus Deutschland werden überwiegend in folgende Anwendungen vermarktet (Mehrfachnennung bei Relevanz möglich):			
☐ keine Aussage / unbekannt ☐ Blasfolien ☐ Extrusionsfolien / Thermoforms ☐ Spritzguss ☐ Intrusionsprodukte ☐ Blasformen ☐ Sonstige (bitte benennen):			
2.4 Werden im Recyclingprozess aus Gründen der Produktqualität Inputqualitäten aus anderen Herkunftsbereichen gemeinsam mit den Systemmengen (im Menü) verarbeitet?			
☐ nein ☐ Systemmengen ausländischer Herkunft ☐ Gewerbemengen ☐ Produktionsabfälle ☐ Sonstige (bitte benennen):			
3 Prozesstechnik			
3.1 Wird die Folienfraktion zur Anreicherung von PE-Folien einer Vorsortierung auf PP-Folien unterzogen?			
nein	ja, manuell	ja, über NIR	ja, über sonstige Techniken
☐	☐	☐	☐
Sonstige bitte näher erläutern:			
3.2 Welche der folgenden Grundverfahren werden aktuell realisiert?			
Grundverfahren	ja	Bemerkungen	
Zerkleinerung	☐		
Wäsche/Reinigung	☐		
Schwimm-Sink-Trennung bei 1 g/cm ³	☐		
Schwimm-Sink-Trennung in Salzlösung bei ca. 1.08 g/cm ³	☐		
Trocknung (ggf. Angabe, ob thermisch und/oder mechanisch)	☐		
Extrusion mit Schmelzefiltration	☐		

Erhebungsbogen Verwertung von Kunststofffolien

Alternative und additive Prozessstufen (z. B. sensorgestützte Vorsortierung der Verpackungen nach Farbe oder Kunststofftyp, stoffliche oder farbliche Sortierung des Mahlguts, Deinking, Vakuumextraktion, Lösemittelbasierte Verfahren)	☐	Falls ja, bitte Grundoperation angeben:				
3.3 Welche Art von Wäsche/Reinigung findet statt und bei welcher ungefähren Temperatur erfolgt die Wäsche?						
☐ Trockenreinigung ☐ Kaltwäsche ☐ Heißwäsche ☐ Sonstige (bitte benennen):						
Erfolgt die Wäsche/Reinigung unter Einsatz von Detergenzien?						
☐ ja ☐ nein						
4 Einschätzung zu potentiell recyclingunverträglichen Verpackungskomponenten oder -ausführungen						
4.1 Welche gestalterischen Verpackungsattribute erachten Sie für Ihre Rezyklatqualitäten als kritisch?						
Beschreibung	Problem unbekannt	Problem nicht gelöst, aber aufgrund geringer Mengenrelevanz bedeutungslos	Problem bekannt, technisch		kein Problem	Bemerkung
			weitgehend gelöst	nicht gelöst		
Geklebte zellulosehaltige Etiketten, die sich unter Bedingungen einer Kaltwäsche nicht ablösen lassen	☐	☐	☐	☐	☐	
PA-Schichten	☐	☐	☐	☐	☐	
PE-X-Komponenten	☐	☐	☐	☐	☐	
PVDC-Schichten	☐	☐	☐	☐	☐	
Sonstige Nicht-PE-Polymerschichten (außer Haftvermittler, Klebstoffe, PP, EVA, EVOH)	☐	☐	☐	☐	☐	
Nicht-Polymer- Schichten (außer SiO _x /AlO _x /Metallisierung)	☐	☐	☐	☐	☐	

Erhebungsbogen Verwertung von Kunststofffolien

4.2 Gibt es sonstige kritische Verpackungsattribute (auch unter dem Aspekt, dass sie außerordentliche Kosten und/oder außerordentlichen technischen Aufwand verursachen können)? Was verursacht ggf. Reklamationen?				
Beschreibung	Aufgrund geringer Mengenrelevanz derzeit nicht bedeutend	Problem bekannt, technisch		Erläuterung
		weitgehend gelöst	nicht gelöst	
	☐	☐	☐	
	☐	☐	☐	
	☐	☐	☐	

A.3 Erhebungsbogen PP-Verwertung

Erhebungsbogen Verwertung von PP

Bitte senden Sie den Erhebungsbogen ausgefüllt an:

Umweltbundesamt
z. Hd. III 1.6 – Frau Grummt
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau
E-Mail: svenja.grummt@uba.de

Absender
Name: _____
Adresse: _____
Tel./E-Mail: _____

1 Kapazität Ihrer Verwertungsanlage				
Die aktuelle technische Kapazität unter Berücksichtigung der genehmigungsrechtlichen Obergrenze beträgt:				
< 5.000 t/a	5.000 bis 10.000 t/a	10.000 bis 15.000 t/a	15.000 bis 20.000 t/a	> 20.000 t/a
☐	☐	☐	☐	☐
2 Inputqualitäten und Produkte				
2.1 Endprodukte des Recyclingprozesses für Systemmengen aus Deutschland sind:				
gewaschenes Mahlgut	gewaschenes Agglomerat	Regranulat	Sonstige (z. B. Formteile)	
☐	☐	☐	☐	
Sonstige bitte näher erläutern:				
2.2 Werden im Recyclingprozess neben der Fraktion 324 auch noch weitere systemstämmige Qualitäten aus Deutschland eingesetzt?				
☐ ja ☐ nein				
Wenn ja, welche (z.B. 322, 323, 329)?				
Fraktionsnummer	Separate Verarbeitung	Im Menü		
	☐	☐		
	☐	☐		
	☐	☐		

Erhebungsbogen Verwertung von PP

2.3 Die Endprodukte des Recyclingprozesses unter Einsatz von Systemmengen aus Deutschland werden überwiegend in folgende Anwendungen vermarktet (Mehrfachnennung bei Relevanz möglich):		
☐ keine Aussage / unbekannt ☐ Blasformen ☐ Extrusionsfolien / Thermoforms ☐ Spritzguss ☐ Intrusionsprodukte ☐ Sonstige (bitte benennen):		
2.4 Werden im Recyclingprozess aus Gründen der Produktqualität Inputqualitäten aus anderen Herkunftsbereichen gemeinsam mit den Systemmengen (im Menü) verarbeitet?		
☐ nein ☐ Systemmengen ausländischer Herkunft ☐ Gewerbemengen ☐ Produktionsabfälle ☐ Sonstige (bitte benennen):		
3 Prozesstechnik		
3.1 Welche der folgenden Grundverfahren werden aktuell realisiert?		
Grundverfahren	ja	Bemerkungen
Zerkleinerung	☐	
Wäsche/Reinigung	☐	
Schwimm-Sink-Trennung bei 1 g/cm ³	☐	
Schwimm-Sink-Trennung in Salzlösung bei ca. 1.08 g/cm ³	☐	
Trocknung (thermisch)	☐	
Extrusion mit Schmelzefiltration	☐	
Alternative und additive Prozessstufen (z. B. sensorgestützte Vorsortierung der Verpackungen nach Farbe oder Kunststofftyp, stoffliche oder farbliche Sortierung des Mahlguts, Deinking, Vakuumextraktion, Lösemittelbasierte Verfahren)	☐	Falls ja, bitte Grundoperation angeben:

Erhebungsbogen Verwertung von PP

3.2 Welche Art von Wäsche/Reinigung findet statt und bei welcher ungefähren Temperatur erfolgt die Wäsche?						
☐ Trockenreinigung ☐ Kaltwäsche ☐ Heißwäsche ☐ Sonstige (bitte benennen):						
°C						
Erfolgt die Wäsche/Reinigung unter Einsatz von Detergenzien?						
☐ ja ☐ nein						
4 Einschätzung zu potentiell recyclingunverträglichen Verpackungskomponenten oder -ausführungen						
4.1 Welche gestalterischen Verpackungsattribute erachten Sie für Ihre Rezyklatqualitäten als kritisch?						
Beschreibung	Problem unbekannt	Problem nicht gelöst, aber aufgrund geringer Mengenrelevanz bedeutungslos	Problem bekannt, technisch		kein Problem	Bemerkung
			weitgehend gelöst	nicht gelöst		
Silikonkomponenten	☐	☐	☐	☐	☐	
Komponenten geschäumter nicht thermoplastischer Elastomere	☐	☐	☐	☐	☐	
Geklebte zellulosehaltige Etiketten, die sich unter den Bedingungen einer Kaltwäsche nicht ablösen lassen	☐	☐	☐	☐	☐	
PA-Schichten	☐	☐	☐	☐	☐	
PVDC-Schichten	☐	☐	☐	☐	☐	
Nicht-PO-Kunststoffe der Dichte < 1 g/cm³	☐	☐	☐	☐	☐	
PET-Sleeves Dichte < 1 g/cm³	☐	☐	☐	☐	☐	
Nicht magnetische Metalle	☐	☐	☐	☐	☐	
4.2 Gibt es sonstige kritische Verpackungsattribute (auch unter dem Aspekt, dass sie außerordentliche Kosten und/oder außerordentlichen technischen Aufwand verursachen können)? Was verursacht ggf. Reklamationen?						
Beschreibung	Aufgrund geringer Mengenrelevanz derzeit nicht bedeutend	Problem bekannt, technisch		Erläuterung		
		weitgehend gelöst	nicht gelöst			
	☐	☐	☐			
	☐	☐	☐			
	☐	☐	☐			

A.4 Erhebungsbogen PE-Verwertung

Erhebungsbogen Verwertung von PE

Bitte senden Sie den Erhebungsbogen ausgefüllt an:

Umweltbundesamt
z. Hd. III 1.6 – Frau Grummt
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau
E-Mail: svenja.grummt@uba.de

Absender
Name: _____
Adresse: _____
Tel./E-Mail: _____

1 Kapazität Ihrer Verwertungsanlage				
Die aktuelle technische Kapazität unter Berücksichtigung der genehmigungsrechtlichen Obergrenze beträgt:				
< 5.000 t/a	5.000 bis 10.000 t/a	10.000 bis 15.000 t/a	15.000 bis 20.000 t/a	> 20.000 t/a
☐	☐	☐	☐	☐
2 Inputqualitäten und Produkte				
2.1 Endprodukte des Recyclingprozesses für Systemmengen aus Deutschland sind:				
gewaschenes Mahlgut	gewaschenes Agglomerat	Regranulat	Sonstige (z. B. Formteile)	
☐	☐	☐	☐	
Sonstige bitte näher erläutern:				
2.2 Werden im Recyclingprozess neben der Fraktion 329 auch noch weitere systemstämmige Qualitäten aus Deutschland eingesetzt?				
☐ ja ☐ nein				
Wenn ja, welche (z.B. 322, 323, 324)?				
Fraktionsnummer	Separate Verarbeitung	Im Menü		
	☐	☐		
	☐	☐		
	☐	☐		

Erhebungsbogen Verwertung von PE

2.3 Die Endprodukte des Recyclingprozesses unter Einsatz von Systemmengen aus Deutschland werden überwiegend in folgende Anwendungen vermarktet (Mehrfachnennung bei Relevanz möglich):		
☐ keine Aussage / unbekannt ☐ Blasformen ☐ Extrusionsfolien / Thermoforms ☐ Spritzguss ☐ Intrusionsprodukte ☐ Sonstige (bitte benennen):		
2.4 Werden im Recyclingprozess aus Gründen der Produktqualität Inputqualitäten aus anderen Herkunftsbereichen gemeinsam mit den Systemmengen (im Menü) verarbeitet?		
☐ nein ☐ Systemmengen ausländischer Herkunft ☐ Gewerbemengen ☐ Produktionsabfälle ☐ Sonstige (bitte benennen):		
3 Prozesstechnik		
3.1 Welche der folgenden Grundverfahren werden aktuell realisiert?		
Grundverfahren	ja	Bemerkungen
Zerkleinerung	☐	
Wäsche/Reinigung	☐	
Schwimm-Sink-Trennung bei 1 g/cm ³	☐	
Schwimm-Sink-Trennung in Salzlösung bei ca. 1.08 g/cm ³	☐	
Trocknung (thermisch)	☐	
Extrusion mit Schmelzefiltration	☐	
Alternative und additive Prozessstufen (z. B. sensorgestützte Vorsortierung der Verpackungen nach Farbe oder Kunststofftyp, stoffliche oder farbliche Sortierung des Mahlguts, Deinking, Vakuumextraktion, Lösemittelbasierte Verfahren)	☐	<i>Falls ja, bitte Grundoperation angeben:</i>

Erhebungsbogen Verwertung von PE

3.2 Welche Art von Wäsche/Reinigung findet statt und bei welcher ungefähren Temperatur erfolgt die Wäsche?						
☐ Trockenreinigung ☐ Kaltwäsche ☐ Heißwäsche ☐ Sonstige (bitte benennen):						
°C						
Erfolgt die Wäsche/Reinigung unter Einsatz von Detergenzien?						
☐ ja ☐ nein						
4 Einschätzung zu potentiell recyclingunverträglichen Verpackungskomponenten oder -ausführungen						
4.1 Welche gestalterischen Verpackungsattribute erachten Sie für Ihre Rezyklatqualitäten als kritisch?						
Beschreibung	Problem unbekannt	Problem nicht gelöst, aber aufgrund geringer Mengenrelevanz bedeutungslos	Problem bekannt, technisch		kein Problem	Bemerkung
			weitgehend gelöst	nicht gelöst		
Silikonkomponenten	☐	☐	☐	☐	☐	
Komponenten geschäumter nicht thermoplastischer Elastomere	☐	☐	☐	☐	☐	
Geklebte zellulosehaltige Etiketten, die sich unter den Bedingungen einer Kaltwäsche nicht ablösen lassen	☐	☐	☐	☐	☐	
PA-Schichten	☐	☐	☐	☐	☐	
PE-X-Komponenten	☐	☐	☐	☐	☐	
PVDC-Schichten	☐	☐	☐	☐	☐	
Nicht-PO-Kunststoffe der Dichte < 1 g/cm³	☐	☐	☐	☐	☐	
PET-Sleeves Dichte < 1 g/cm³	☐	☐	☐	☐	☐	
Nicht magnetische Metalle	☐	☐	☐	☐	☐	
4.2 Gibt es sonstige kritische Verpackungsattribute (auch unter dem Aspekt, dass sie außerordentliche Kosten und/oder außerordentlichen technischen Aufwand verursachen können)? Was verursacht ggf. Reklamationen?						
Beschreibung	Aufgrund geringer Mengenrelevanz derzeit nicht bedeutend	Problem bekannt, technisch		Erläuterung		
		weitgehend gelöst	nicht gelöst			
	☐	☐	☐			
	☐	☐	☐			
	☐	☐	☐			

A.5 Erhebungsbogen MPO- und PO-flex-Verwertung

Erhebungsbogen Verwertung von MPO und PO-flex

Bitte senden Sie den Erhebungsbogen ausgefüllt an:

Umweltbundesamt
z. Hd. III 1.6 – Frau Grummt
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau
E-Mail: svenja.grummt@uba.de

Absender
Name: _____
Adresse: _____
Tel./E-Mail: _____

1 Kapazität Ihrer Verwertungsanlage				
Die aktuelle technische Kapazität unter Berücksichtigung der genehmigungsrechtlichen Obergrenze beträgt:				
< 5.000 t/a	5.000 bis 10.000 t/a	10.000 bis 15.000 t/a	15.000 bis 20.000 t/a	> 20.000 t/a
☐	☐	☐	☐	☐
2 Inputqualitäten und Produkte				
2.1 Endprodukte des Recyclingprozesses für Systemmengen aus Deutschland sind:				
gewaschenes Mahlgut	gewaschenes Agglomerat	Regranulat	Sonstige (z. B. Formteile)	
☐	☐	☐	☐	
Sonstige bitte näher erläutern:				
2.2 Werden im Recyclingprozess neben den Fraktionen 323 und 323-2 auch noch weitere systemstämmige Qualitäten aus Deutschland eingesetzt?				
☐ ja				
☐ nein				
Wenn ja, welche (z.B. 322, 329, 324)?				
Fraktionsnummer	Separate Verarbeitung	Im Menü		
	☐	☐		
	☐	☐		
	☐	☐		

Erhebungsbogen Verwertung von MPO und PO-flex

2.3 Die Endprodukte des Recyclingprozesses unter Einsatz von Systemmengen aus Deutschland werden überwiegend in folgende Anwendungen vermarktet (Mehrfachnennung bei Relevanz möglich):		
☐ keine Aussage / unbekannt ☐ Blasformen ☐ Extrusionsfolien / Thermoforms ☐ Spritzguss ☐ Intrusionsprodukte ☐ Sonstige (bitte benennen):		
2.4 Werden im Recyclingprozess aus Gründen der Produktqualität Inputqualitäten aus anderen Herkunftsbereichen gemeinsam mit den Systemmengen (im Menü) verarbeitet?		
☐ nein ☐ Systemmengen ausländischer Herkunft ☐ Gewerbemengen ☐ Produktionsabfälle ☐ Sonstige (bitte benennen):		
3 Prozesstechnik		
3.1 Welche der folgenden Grundverfahren werden aktuell realisiert?		
Grundverfahren	ja	Bemerkungen
Zerkleinerung	☐	
Wäsche/Reinigung	☐	
Schwimm-Sink-Trennung bei 1 g/cm ³	☐	
Schwimm-Sink-Trennung in Salzlösung bei ca. 1.08 g/cm ³	☐	
Trocknung (thermisch)	☐	
Extrusion mit Schmelzefiltration	☐	
Alternative und additive Prozessstufen (z. B. sensorgestützte Vorsortierung der Verpackungen nach Farbe oder Kunststofftyp, stoffliche oder farbliche Sortierung des Mahlguts, Deinking, Vakuumextraktion, Lösemittelbasierte Verfahren)	☐	Falls ja, bitte Grundoperation angeben:

Erhebungsbogen Verwertung von MPO und PO-flex

3.2 Welche Art von Wäsche/Reinigung findet statt und bei welcher ungefähren Temperatur erfolgt die Wäsche?						
☐ Trockenreinigung ☐ Kaltwäsche ☐ Heißwäsche ☐ Sonstige (bitte benennen):						
°C						
Erfolgt die Wäsche/Reinigung unter Einsatz von Detergenzien?						
☐ ja ☐ nein						
4 Einschätzung zu potentiell recyclingunverträglichen Verpackungskomponenten oder -ausführungen						
4.1 Welche gestalterischen Verpackungsattribute erachten Sie für Ihre Rezyklatqualitäten als kritisch?						
Beschreibung	Problem unbekannt	Problem nicht gelöst, aber aufgrund geringer Mengenrelevanz bedeutungslos	Problem bekannt, technisch		kein Problem	Bemerkung
			weitgehend gelöst	nicht gelöst		
Silikonkomponenten	☐	☐	☐	☐	☐	
Geschäumte nicht thermoplastische Elastomere mit der Dichte < 1 g/cm³	☐	☐	☐	☐	☐	
Geschäumte nicht-polyolefinische Komponenten	☐	☐	☐	☐	☐	
PA-Schichten	☐	☐	☐	☐	☐	
Geklebte zellulosehaltige Etiketten, die sich unter Bedingungen einer Kaltwäsche nicht ablösen lassen	☐	☐	☐	☐	☐	
4.2 Gibt es sonstige kritische Verpackungsattribute (auch unter dem Aspekt, dass sie außerordentliche Kosten und/oder außerordentlichen technischen Aufwand verursachen können)? Was verursacht ggf. Reklamationen?						
Beschreibung	Aufgrund geringer Mengenrelevanz derzeit nicht bedeutend	Problem bekannt, technisch		Erläuterung		
		weitgehend gelöst	nicht gelöst			
	☐	☐	☐			
	☐	☐	☐			
	☐	☐	☐			

A.6 Erhebungsbogen PS-Verwertung

Erhebungsbogen Verwerter von PS

Bitte senden Sie den Erhebungsbogen ausgefüllt an:

Umweltbundesamt

z. Hd. III 1.6 – Frau Grummt
 Wörlitzer Platz 1
 06844 Dessau-Roßlau
 E-Mail: svenja.grummt@uba.de

Absender

Name: _____
 Adresse: _____
 Tel./E-Mail: _____

1 Kapazität Ihrer Verwertungsanlage				
Die aktuelle technische Kapazität unter Berücksichtigung der genehmigungsrechtlichen Obergrenze beträgt:				
< 5.000 t/a	5.000 bis 10.000 t/a	10.000 bis 15.000 t/a	15.000 bis 20.000 t/a	> 20.000 t/a
☐	☐	☐	☐	☐
2 Inputqualitäten und Produkte				
2.1 Endprodukte des Recyclingprozesses für Systemmengen aus Deutschland sind:				
gewaschenes Mahlgut	gewaschenes Agglomerat	Regranulat	Sonstige	
☐	☐	☐	☐	
Sonstige bitte näher erläutern:				
2.2 Die Endprodukte des Recyclingprozesses unter Einsatz von Systemmengen aus Deutschland werden überwiegend in folgende Anwendungen vermarktet:				
☐ keine Aussage / unbekannt ☐ Spritzguss ☐ Sonstige (bitte benennen):				
2.3 Werden im Recyclingprozess neben der Fraktion 331 auch noch weitere systemstämmige Qualitäten aus Deutschland eingesetzt?				
☐ ja ☐ nein				
Wenn ja, welche (z. B. 330)?				
Fraktionsnummer	Separate Verarbeitung	Im Menü		
	☐	☐		
	☐	☐		
	☐	☐		

Erhebungsbogen Verwerter von PS

2.4 Werden im Recyclingprozess aus Gründen der Produktqualität Inputqualitäten aus anderen Herkunftsbereichen gemeinsam mit den Systemmengen (im Menü) verarbeitet?		
☐ nein ☐ Systemmengen ausländischer Herkunft ☐ Gewerbemengen ☐ Produktionsabfälle ☐ Sonstige (bitte benennen):		
3 Prozesstechnik		
3.1 Welche der folgenden Grundverfahren werden aktuell realisiert?		
Grundverfahren	ja	Bemerkungen
Zerkleinerung	☐	
Wäsche/Reinigung	☐	
Schwimm-Sink-Trennung bei 1 g/cm ³	☐	
Schwimm-Sink-Trennung in Salzlösung bei ca. 1.08 g/cm ³	☐	
Trocknung (thermisch)	☐	
Extrusion mit Schmelzefiltration	☐	
Alternative und additive Prozessstufen (z. B. sensorgestützte Vorsortierung der Verpackungen nach Farbe oder Kunststofftyp, stoffliche oder farbliche Sortierung des Mahlguts, Deinking, Vakuumextraktion, Lösemittelbasierte Verfahren)	☐	Falls ja, bitte Grundoperation angeben:
3.2 Welche Art von Wäsche/Reinigung findet statt und bei welcher ungefähren Temperatur erfolgt die Wäsche?		
☐ Trockenreinigung ☐ Kaltwäsche ☐ Heißwäsche ☐ Sonstige (bitte benennen):		°C
Erfolgt die Wäsche/Reinigung unter Einsatz von Detergenzien?		
☐ ja ☐ nein		

Erhebungsbogen Verwerter von PS

4 Einschätzung zu potentiell recyclingunverträglichen Verpackungskomponenten oder -ausführungen						
4.1 Welche gestalterischen Verpackungsattribute erachten Sie für Ihre Rezyklatqualitäten als kritisch?						
Beschreibung	Problem unbekannt	Problem nicht gelöst, aber aufgrund geringer Mengenrelevanz bedeutungslos	Problem bekannt, technisch		kein Problem	Bemerkung
			Weitgehend gelöst	nicht gelöst		
Fremdkunststoffe oder Multilayer der Dichteklasse 1,0 – 1,08 g/cm ³	☐	☐	☐	☐	☐	
Geklebte zellulosehaltige Etiketten, die sich unter Bedingungen einer Kaltwäsche nicht ablösen lassen	☐	☐	☐	☐	☐	
Nicht magnetische Metalle	☐	☐	☐	☐	☐	
4.2 Gibt es sonstige kritische Verpackungsattribute (auch unter dem Aspekt, dass sie außerordentliche Kosten und/oder außerordentlichen technischen Aufwand verursachen können)? Warum gibt es ggf. Reklamationen?						
Beschreibung	Aufgrund geringer Mengenrelevanz derzeit nicht bedeutend	Problem bekannt, technisch		Erläuterung		
		weitgehend gelöst	nicht gelöst			
	☐	☐	☐			
	☐	☐	☐			
	☐	☐	☐			

A.7 Erhebungsbogen PET-Verwertung

Erhebungsbogen PET-Recyclinganlagen

**Bitte senden Sie den Erhebungsbogen
ausgefüllt an:**

Umweltbundesamt
z. Hd. III 1.6 – Frau Grummt
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau
E-Mail: svenja.grummt@uba.de

Absender
Name: _____
Adresse: _____
Tel./E-Mail: _____

1 Kapazität Ihrer Verwertungsanlage						
Die aktuelle technische Kapazität unter Berücksichtigung der genehmigungsrechtlichen Obergrenze beträgt:						
< 15.000 t/a	15.000 bis 30.000 t/a	30.000 bis 45.000 t/a	45.000 bis 60.000 t/a	> 60.000 t/a		
☐	☐	☐	☐	☐		
2 Inputqualitäten und Produkte						
2.1 Welche Inputqualitäten aus Systemen nach § 3 Abs. 16 VerpackG werden verarbeitet?						
325	328-1	328-2	328-3	328-5	328-6	Sonstige
☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Sonstige bitte näher erläutern:						
2.2 Endprodukte des Recyclingprozesses für Systemmengen aus Deutschland sind:						
gewaschenes Mahlgut (Flakes)	PET-Regranulat		aufkondensiertes PET-Regranulat		Sonstige (z. B. Preforms)	
☐	☐		☐		☐	
Sonstige bitte näher erläutern:						

Erhebungsbogen PET-Recyclinganlagen

2.3 Die Endprodukte des Recyclingprozesses unter Einsatz von Systemmengen aus Deutschland werden überwiegend in folgende Anwendungen vermarktet (Mehrfachnennung bei Relevanz möglich):		
☐ keine Aussage / unbekannt ☐ PET-Preforms ☐ PET-Folien ☐ PET-Bänder (Strapping) ☐ Polyesterfaser-Anwendungen ☐ Sonstige (bitte benennen):		
2.4 Werden im Recyclingprozess neben den Fraktionen (325, 328-(1-6)) auch noch weitere systemstämmige Qualitäten aus Deutschland (z. B. vorsortierte oder farbsortierte Fraktionen) eingesetzt?		
☐ ja ☐ nein		
Wenn ja, welche?		
Fraktionsnummer	separate Verarbeitung	im Menü (gemeinsame Verarbeitung)
	☐	☐
	☐	☐
	☐	☐
2.5 Werden im Recyclingprozess aus Gründen der Produktqualität Inputqualitäten aus anderen Herkunftsbereichen gemeinsam mit den Systemmengen (im Menü) verarbeitet?		
☐ ja ☐ nein		
Wenn ja, welche?		
☐ Systemmengen ausländischer Herkunft ☐ Mengen aus Pfandsystemen ☐ Produktionsabfälle (z. B. Preforms) ☐ Sonstige (bitte benennen):		

Erhebungsbogen PET-Recyclinganlagen

3 Prozesstechnik		
3.1 Werden die systemstämmigen Eingangsqualitäten einer Vorsortierung (intern oder extern) auf spezielle PET-Verpackungen unterzogen?		
☐ ja ☐ nein		
Falls ja, bitte die Verpackungen ankreuzen, die als Störstoffe angesprochen werden:		
Verpackung	Aussortierung	
	Manuell	NIR-VIS
☐ PET-Monolayer-Schalen	☐	☐
☐ PET-Multilayer-Schalen	☐	☐
☐ Flaschen mit Funktionsverschlüssen	☐	☐
☐ Nicht-Getränkeflaschen	☐	☐
☐ Flaschen mit PA-Barriere (wie Saftflaschen)	☐	☐
☐ Flaschen mit Teil-Sleeve	☐	☐
☐ Flaschen mit Full-Sleeve	☐	☐
☐ Sonstige	☐	☐
Sonstige bitte näher erläutern:		
3.2 Welche der folgenden Grundverfahren wurden in 2022 bzw. werden aktuell realisiert?		
Grundverfahren	ja	Bemerkungen
NIR-Sortierung (NIR-VIS)	☐	
Farbsortierung	☐	
Zerkleinerung	☐	
Wäsche/Reinigung	☐	
Schwimm-Sink-Sortierung bei 1 g/cm ³	☐	
Trocknung (thermisch)	☐	
Trockene Nachsortierung der Flakes u. a. über Windsichtung	☐	
Extrusion mit Schmelzefiltration	☐	
Solid State Polymerisation (SSP)	☐	

Erhebungsbogen PET-Recyclinganlagen

Alternative und wesentliche additive Prozessstufen (z. B. URRC-Prozess oder Lösemittelverfahren)	☐	☐	Falls ja, bitte Grundoperation angeben:			
3.3 Welche Art Wäsche/Reinigung findet statt und bei welcher ungefähren Temperatur erfolgt diese?						
☐ Trockenreinigung ☐ Kaltwäsche ☐ Heißwäsche ☐ URRC-Prozess ☐ Sonstige (bitte benennen): °C						
Erfolgt die Wäsche/Reinigung unter Einsatz von Detergenzien?						
☐ ja ☐ nein						
Erfolgt die Wäsche/Reinigung unter Einsatz von Natronlauge?						
☐ ja ☐ nein						
4 Einschätzung zu potentiell recyclingunverträglichen Verpackungskomponenten oder -ausführungen						
4.1 Welche gestalterischen Verpackungsattribute erachten Sie für Ihre Rezyklatqualitäten als kritisch?						
Beschreibung	Problem unbekannt	Problem nicht gelöst, aber aufgrund geringer Mengenrelevanz bedeutungslos	Problem bekannt, technisch		kein Problem	Bemerkung
			welt- gehend gelöst	nicht gelöst		
PET-G-Komponenten	☐	☐	☐	☐	☐	
POM-Komponenten	☐	☐	☐	☐	☐	
PVC-Komponenten	☐	☐	☐	☐	☐	
EVOH-Schichten	☐	☐	☐	☐	☐	
PA-Monolayer-Schichten für transparente PET-Flaschen, farblos und „light-blue“	☐	☐	☐	☐	☐	
PVC-, PS-, PET-G-Etiketten/Sleeves	☐	☐	☐	☐	☐	

Erhebungsbogen PET-Recyclinganlagen

PET-C-Etiketten/Sleeves	☐	☐	☐	☐	☐	
Sonstige blended barriers	☐	☐	☐	☐	☐	
PA-Additivierung für transparente PET-Flaschen, farblos und „light-blue“	☐	☐	☐	☐	☐	
Nicht ablösbare (abwaschbare) Klebstoffapplikationen (in Wasser oder alkalisch bei 80 °C)	☐	☐	☐	☐	☐	
Nicht magnetische Metalle	☐	☐	☐	☐	☐	
Elastomer-Komponenten der Dichte > 1 g/cm³	☐	☐	☐	☐	☐	
Direktdruck (abgesehen von Produktionscode und MHD)	☐	☐	☐	☐	☐	
Silikonkomponenten	☐	☐	☐	☐	☐	
4.2 Gibt es sonstige kritische Verpackungsattribute (auch unter dem Aspekt, dass sie außerordentliche Kosten und/oder außerordentlichen technischen Aufwand verursachen können)? Was verursacht ggf. Reklamationen?						
Beschreibung	Aufgrund geringer Mengenrelevanz derzeit nicht bedeutend	Problem bekannt, technisch		Erläuterung		
		weitgehend gelöst	nicht gelöst			
	☐	☐	☐			
	☐	☐	☐			
	☐	☐	☐			

A.8 Erhebungsbogen Aluminiumaufbereitung und -verwertung

Erhebungsbogen Aluminiumaufbereitung und -verwertung

**Bitte senden Sie den Erhebungsbogen
ausgefüllt an:**

Umweltbundesamt
z. Hd. III 1.6 – Frau Grummt
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau
E-Mail: svenja.grummt@uba.de

Absender
Name: _____
Adresse: _____
Tel./E-Mail: _____

1 Kapazität Ihrer Anlage				
Die aktuelle technische Kapazität unter Berücksichtigung der genehmigungsrechtlichen Obergrenze beträgt:				
< 5.000 t/a	5.000 bis 50.000 t/a	50.000 bis 100.000 t/a	100.000 bis 150.000 t/a	> 150.000 t/a
☐	☐	☐	☐	☐
2 Inputqualitäten und Endprodukte				
2.1 Welche Inputqualitäten aus Systemen nach § 3 Abs. 16 VerpackG werden verarbeitet?				
420	Aluminiumfraktion aus der Glasaufbereitung		Sonstige	
☐	☐		☐	
Sonstige bitte näher erläutern:				
2.2 Werden im Recyclingprozess aus Gründen der Produktqualität Inputqualitäten aus anderen Herkunftsbereichen gemeinsam mit den Systemmengen (im Menü) verarbeitet?				
☐ nein ☐ ja, Primärmaterial – Wenn angekreuzt, zu welchem Anteil? (Angabe als Spannbreite möglich): ☐ ja, Systemmengen ausländischer Herkunft ☐ ja, Produktionsabfälle ☐ ja, Mengen aus Pfandsystemen ☐ ja, Sonstige (bitte benennen):				
2.3 Endprodukte des Recyclingprozesses für Systemmengen aus Deutschland sind:				
Aluminium – Gusslegierung	Aluminium – Knetlegierung	Eisenschrott	Sonstige	
☐	☐	☐	☐	

Seite | 1

Erhebungsbogen Aluminiaufbereitung und -verwertung

<i>Sonstige bitte näher erläutern:</i>		
2.4 Die Endprodukte des Recyclingprozesses unter Einsatz von Systemmengen aus Deutschland werden überwiegend in folgende Anwendungen vermarktet (Mehrfachnennung bei Relevanz möglich):		
☐ keine Aussage / unbekannt ☐ Dosen ☐ Feuerwerkskörper ☐ Farbpigmente ☐ Sonstige (bitte benennen):		
3 Prozesstechnik		
3.1 Werden die systemstämmigen Inputqualitäten einer Vorsortierung (intern oder extern) unterzogen?		
☐ ja ☐ nein		
Falls ja, bitte die Verpackungen angeben, die als Störstoffe angesprochen werden:		
Verpackung	Aussortierung mittels welcher Technik? Bitte eintragen, falls die Sortierung nicht manuell erfolgt.	
☐ Aerosoldosen	☐ Manuell	☐
	☐ Manuell	☐
	☐ Manuell	☐
<i>Erläuterung:</i>		
3.2 Welche der folgenden Grundverfahren wurden in 2022 bzw. werden aktuell realisiert?		
Grundverfahren	ja	Bemerkungen
Vorsortierung	☐	
Zerkleinerung	☐	
Magnetabscheidung	☐	
Wirbelstromabscheidung	☐	
Pyrolyse	☐	
Bankglühe / Umschmelzen	☐	
Nachsortierung auf NE-Metalle	☐	
Kompaktierung / Verpressung	☐	
Schmelze	☐	

Erhebungsbogen Aluminiumaufbereitung und -verwertung

Alternative und wesentliche additive Prozessstufen (z. B. Sortierung nach Legierungsgruppen)	☐	Falls ja, bitte Grundoperation angeben:				
3.3 Ab welcher ungefähren Dicke der Aluminiumschicht ist eine Verpackung recyclingfähig?						
4 Einschätzung zu potentiell recyclingunverträglichen Verpackungskomponenten oder -ausführungen						
4.1 Welche gestalterischen Verpackungsattribute erachten Sie für Ihre Rezyklatqualitäten als kritisch?						
Beschreibung	Problem unbekannt	Problem nicht gelöst, aber aufgrund geringer Mengenrelevanz bedeutungslos	Problem technisch		kein Problem	Bemerkung
			weitgehend gelöst	nicht gelöst		
Geringe Materialstärken	☐	☐	☐	☐	☐	
Komponenten aus Blei	☐	☐	☐	☐	☐	
Komponenten aus anderen Aluminiumlegierungen als üblich	☐	☐	☐	☐	☐	Welche Legierungen bzw. welche Verpackungen sind kritisch?
Druckfarben	☐	☐	☐	☐	☐	Welche Bestandteile von Druckfarben sind besonders kritisch?
Komponenten aus PVC	☐	☐	☐	☐	☐	
Aerosoldosen mit kohlenwasserstoffbasiertem Treibmittel oder anderen Restinhalten	☐	☐	☐	☐	☐	
Dickwandige Gasdruckflaschen oder-kartuschen	☐	☐	☐	☐	☐	

Erhebungsbogen Aluminiumaufbereitung und -verwertung

Sonstige Verpackungen mit konstruktionsbedingtem Restinhalt	☐	☐	☐	☐	☐	Welche Verpackungen bzw. Restinhalte sind besonders kritisch?
Verbundverpackungen	☐	☐	☐	☐	☐	Welche Verbundverpackungen sind besonders kritisch und warum?
4.2 Gibt es sonstige kritische Verpackungsattribute (auch unter dem Aspekt, dass sie außerordentliche Kosten und/oder außerordentlichen technischen Aufwand verursachen können)? Warum gibt es ggf. Reklamationen?						
Beschreibung	Aufgrund geringer Mengenrelevanz derzeit nicht bedeutend	Problem bekannt, technisch		Erläuterung		
		weitgehend gelöst	nicht gelöst			
	☐	☐	☐			
	☐	☐	☐			
	☐	☐	☐			

A.9 Erhebungsbogen Weißblechaufbereitung und -verwertung

Erhebungsbogen Weißblechaufbereitung und -verwertung

**Bitte senden Sie den Erhebungsbogen
ausgefüllt an:**

Umweltbundesamt
z. Hd. III 1.6 – Frau Grummt
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau
E-Mail: svenja.grummt@uba.de

Absender
Name: _____
Adresse: _____
Tel./E-Mail: _____

1 Kapazität Ihrer Anlage				
Die aktuelle technische Kapazität unter Berücksichtigung der genehmigungsrechtlichen Obergrenze beträgt:				
< 5.000 t/a	5.000 bis 50.000 t/a	50.000 bis 100.000 t/a	100.000 bis 150.000 t/a	> 150.000 t/a
☐	☐	☐	☐	☐
2 Inputqualitäten und Produkte				
2.1 Welche Inputqualitäten aus Systemen nach § 3 Abs. 16 VerpackG werden verarbeitet?				
410/412	Weißblechfraktion aus der Glasaufbereitung		Sonstige	
☐	☐		☐	
Sonstige bitte näher erläutern:				
2.2 Werden im Recyclingprozess aus Gründen der Produktqualität Inputqualitäten aus anderen Herkunftsbereichen gemeinsam mit den Systemmengen (im Menü) verarbeitet?				
☐ nein ☐ ja, Primärmaterial – Wenn angekreuzt, zu welchem Anteil? (Angabe als Spannbreite möglich): ☐ ja, Systemmengen ausländischer Herkunft ☐ ja, Produktionsabfälle ☐ ja, Sonstige (bitte benennen):				
2.3 Endprodukte des Recyclingprozesses für Systemmengen aus Deutschland sind:				
Stahl	Nichteisenmetalle		Sonstige	
☐	☐		☐	
Sonstige bitte näher erläutern:				

Erhebungsbogen Weißblechaufbereitung und -verwertung

2.4 Die Endprodukte des Recyclingprozesses unter Einsatz von Systemmengen aus Deutschland werden überwiegend in folgende Anwendungen vermarktet (Mehrfachnennung bei Relevanz möglich):		
☐ keine Aussage / unbekannt ☐ Dosen ☐ Sonstige (bitte benennen):		
3 Prozesstechnik		
3.1 Werden die systemstämmigen Inputqualitäten einer Vorsortierung (intern oder extern) unterzogen?		
☐ ja ☐ nein		
Falls ja, bitte die Verpackungen angeben, die als Störstoffe angesprochen werden:		
Verpackung	AusSORTIERUNG mittels welcher Technik? Bitte eintragen, falls die Sortierung nicht manuell erfolgt.	
☐ Gasdruckflaschen	☐ Manuell	☐
	☐ Manuell	☐
	☐ Manuell	☐
Erläuterung:		
3.2 Welche der folgenden Grundverfahren wurden in 2022 bzw. werden aktuell realisiert?		
Grundverfahren	ja	Bemerkungen
Vorsortierung	☐	
Mechanischer Aufschluss / Shreddern	☐	
Windsichtung	☐	
Magnetabscheidung	☐	
Wirbelstromabscheidung	☐	
Entzinnung	☐	
Schmelze	☐	
Alternative und wesentliche additive Prozessstufen (z. B. Sortierung von Legierungsgruppen)	☐	Falls ja, bitte Grundoperation angeben:

Erhebungsbogen Weißblechaufbereitung und -verwertung

4 Einschätzung zu potentiell recyclingunverträglichen Verpackungskomponenten oder -ausführungen						
4.1 Welche gestalterischen Verpackungsattribute erachten Sie für Ihre Rezyklatqualitäten als kritisch?						
Beschreibung	Problem unbekannt	Problem nicht gelöst, aber aufgrund geringer Mengenrelevanz bedeutungslos	Problem technisch		kein Problem	Bemerkung
			weitgehend gelöst	nicht gelöst		
Komponenten aus anderen Stahllegierungen als üblich	☐	☐	☐	☐	☐	
Dickwandige Gasdruckflaschen oder-kartuschen	☐	☐	☐	☐	☐	Wie entfernen Sie Restinhalte?
Konstruktionsbedingter Restinhalt	☐	☐	☐	☐	☐	Welche Verpackungen bzw. Füllgutreste sind problematisch (z. B. Lackdosen)?
Verbundverpackungen	☐	☐	☐	☐	☐	Welche Verbundverpackungen sind kritisch?
Komponenten aus PVC	☐	☐	☐	☐	☐	
Komponenten aus Blei	☐	☐	☐	☐	☐	
4.2 Gibt es sonstige kritische Verpackungsattribute (auch unter dem Aspekt, dass sie außerordentliche Kosten und/oder außerordentlichen technischen Aufwand verursachen können)? Warum gibt es ggf. Reklamationen?						
Beschreibung	Aufgrund geringer Mengenrelevanz derzeit nicht bedeutend	Problem bekannt, technisch		Erläuterung		
		weitgehend gelöst	nicht gelöst			
	☐	☐	☐			
	☐	☐	☐			
	☐	☐	☐			

A.10 Erhebungsbogen FKN- und PPK aus LVP-Verwertung

Erhebungsbogen Verwerter von FKN und PPK aus LVP

Bitte senden Sie den Erhebungsbogen ausgefüllt an:

Umweltbundesamt
z. Hd. III 1.6 – Frau Grummt
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau
E-Mail: svenja.grummt@uba.de

Absender
Name: _____
Adresse: _____
Tel./E-Mail: _____

1 Kapazität Ihrer Verwertungsanlage									
Die aktuelle technische Kapazität unter Berücksichtigung der genehmigungsrechtlichen Obergrenze beträgt:									
< 25.000 t/a	25.000 bis 50.000 t/a	50.000 bis 75.000 t/a	75.000 bis 100.000 t/a	> 100.000 t/a					
☐	☐	☐	☐	☐					
2 Inputqualitäten und Produkte									
2.1 Welche Inputqualitäten aus Systemen nach § 3 Abs. 16 VerpackG werden verarbeitet?¹ Hinweis: 1.11.00 Deinkingware zählt nicht zu den Systemmengen.									
1.01	1.02	1.04.xx	1.05.xx	5.02	5.03	510 ²	512 ³	550 ⁴	Sonstige
☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Sonstige bitte näher erläutern:									
2.2 Endprodukte des Recyclingprozesses für Systemmengen aus Deutschland sind:									
Wellpappenrohapiere		Karton oder Pappe		Hygienepapiere		Sonstige			
☐		☐		☐		☐			
Sonstige bitte näher erläutern:									

¹ Die Bedeutung der Nummern kann DIN EN 643 und den Produktspezifikationen der Verpackungsfraktionen der dualen Systeme entnommen werden.

² Produktspezifikation Fraktions-Nr. 510 „Flüssigkeitskartons“.

³ Produktspezifikation Fraktions-Nr. 512 „Flüssigkeitskartons/Getränkekartons“.

⁴ Produktspezifikation Fraktions-Nr. 550 „PPK aus LVP“.

Erhebungsbogen Verwerter von FKN und PPK aus LVP

2.3 Welche Fraktionen/Sorten werden separat und welche gemeinsam verarbeitet (z. B. PPK aus LVP gemeinsam mit FKN oder anderen Altpapiersorten)?		
Nummer Sorte/Fraktion	Separate Verarbeitung	Gemeinsame Verarbeitung („Rezeptur“)
	☐	☐
	☐	☐
	☐	☐
2.4 Werden im Recyclingprozess aus Gründen der Produktqualität Inputqualitäten aus anderen Herkunftsbereichen gemeinsam mit den Systemmengen („Rezeptur“) verarbeitet?		
☐ nein ☐ Systemmengen ausländischer Herkunft ☐ Gewerbemengen ☐ Produktionsabfälle ☐ Primärrohstoffe ☐ Sonstige (bitte benennen):		
3 Prozesstechnik		
3.1 Welche der folgenden Grundverfahren werden aktuell realisiert?		
Grundverfahren	ja	Bemerkungen
Vorzerkleinerung	☐	
Stofflösung (ggf. Angabe, ob Pulper oder Trommel)	☐	
Faserrückgewinnung aus Rejekten der primären Stofflösung	☐	
Sortier- und Reinigungsstufen zur Faserstoffaufbereitung	☐	
Sieb-/Press-/Trockenpartie	☐	
Werkstofflich hochwertige Rejektverwertung (PO, Metallanteile)	☐	
Alternative und additive Prozessstufen (z. B. Hygienisierung)	☐	Falls ja, bitte Grundoperation angeben:

Erhebungsbogen Verwerter von FKN und PPK aus LVP

3.2 Wie lang ist die Stofflösezeit und bei welcher Temperatur erfolgt diese ungefähr?						
		min		°C		
3.3 Im Rahmen der Sortier- und Reinigungsstufen der Faserstoffaufbereitung bei Einsatz aus Systemmengen sollen folgende Komponenten als Störstoffe in die Rejekte ausgeschleust werden:						
☐ feinkörnige mineralische Verunreinigungen (Sand, Steine, Glassplitter) ☐ Kunststoffpartikel ☐ Makrostickets ☐ Stippen ☐ Kurzfasern ☐ Füllstoffe ☐ Streichfarben ☐ Sonstige (bitte benennen):						
3.4 Wie hoch ist die Maximaltemperatur der Trockenzylinder bei der Papiertrocknung ungefähr?						
		°C				
4 Einschätzung zu potentiell recyclingunverträglichen Verpackungskomponenten oder -ausführungen						
4.1 Welche gestalterischen Verpackungsattribute erachten Sie für Ihre Rezyklatqualitäten als kritisch?						
Beschreibung	Problem unbekannt	Problem nicht gelöst, aber aufgrund geringer Mengenrelevanz bedeutungslos	Problem bekannt, technisch		kein Problem	Bemerkung
			weitgehend gelöst	nicht gelöst		
Nicht wasserlösliche oder nicht redispersierende Klebstoffapplikationen	☐	☐	☐	☐	☐	
Komponenten der EuPIA (Exclusion list for printing inks and related products)	☐	☐	☐	☐	☐	
4.2 Gibt es sonstige kritische Verpackungsattribute (auch unter dem Aspekt, dass sie außerordentliche Kosten und/oder einen hohen technischen Aufwand verursachen können)? Warum gibt es ggf. Reklamationen?						
Beschreibung	Aufgrund geringer Mengenrelevanz derzeit nicht bedeutend	Problem bekannt, technisch		Erläuterung		
		weitgehend gelöst	nicht gelöst			
	☐	☐	☐			
	☐	☐	☐			
	☐	☐	☐			

A.11 Erhebungsbogen PPK-Sortieranlagen

Erhebungsbogen PPK-Sortieranlagen

**Bitte senden Sie den Erhebungsbogen
ausgefüllt an:**

Umweltbundesamt

z. Hd. III 1.6 – Frau Grummt
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau
E-Mail: svenja.grummt@uba.de

Absender

Name: _____
Adresse: _____
Tel./E-Mail: _____

1 Kapazität Ihrer Anlage									
1.1 Die aktuelle technische Kapazität unter Berücksichtigung der genehmigungsrechtlichen Obergrenze beträgt:									
< 5.000 t/a	5.000 bis 50.000 t/a		50.000 bis 100.000 t/a		100.000 bis 150.000 t/a		> 150.000 t/a		
☐	☐		☐		☐		☐		
1.2 Die Verarbeitungsmenge für PPK Verpackungen aus dem Blauen System (haushaltsnahe Sammlung) (gerundet auf 1.000 t/a) betrug									
im Jahr 2021:						t/a		Bemerkungen:	
im Jahr 2022:						t/a			
2 Inputqualitäten und Produkte									
2.1 Welche Inputqualitäten werden sortiert?									
Blaue Tonne	PPK aus LVP		Gewerbeabfälle		Restabfall		Sonstige		
☐	☐		☐		☐		☐		
Sonstige bitte näher erläutern:									
2.2 Welche Altpapiersorten werden für Systemmengen aus Deutschland am Ende des Prozesses für ein Recycling bereitgestellt? Hinweis: 1.11.00 Deinkingware zählt nicht zu den Systemmengen.									
1.01	1.02	1.04.xx	1.05.xx	4.02	4.03	5.02	5.03	Sonstige	
☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	

Erhebungsbogen PPK-Sortieranlagen

<i>Sonstige bitte näher erläutern:</i>				
2.3 Endprodukte des anschließenden Recyclingprozesses für Systemmengen aus Deutschland sind:				
Wellpappenroh- papiere	Karton und Pappe	Hygienepapiere	Sonstige	Unbekannt
☐	☐	☐	☐	☐
<i>Sonstige bitte näher erläutern:</i>				
2.4 Sind die Endprodukte für den Lebensmittelkontakt zugelassen?				
☐ ja ☐ nein ☐ unbekannt				
3 Prozesstechnik				
3.1 Welche der folgenden Grundverfahren wurden in 2022 bzw. werden aktuell realisiert?				
Grundverfahren	ja	Bemerkungen		
Vorsortierung	☐			
Ballistische Separatoren zur Klassierung	☐			
Grobsiebung	☐			
Feinsiebung	☐			
Magnetabscheidung	☐			
Paperspike	☐			
Sensorgestützte Sortierstufe (ggf. Anzahl der Stufen)	☐			
Sortierkabine	☐			
Alternative und wesentliche additive Prozessstufen (z. B. optische Erkennungsverfahren, Windsichter)	☐	<i>Falls ja, bitte Grundoperation angeben:</i>		

Erhebungsbogen PPK-Sortieranlagen

3.2	Welche faserbasierten Verpackungen oder -komponenten werden aussortiert und anschließend energetisch verwertet?
☐ Kaffeebecher To-Go ☐ Verpackungen für Tiefkühlprodukte (z. B. für Fischstäbchen, Spinat, Kräuter, Beeren) ☐ Verpackungen für Fleisch/Fisch/Käse ☐ Thermoetiketten ☐ Silikonpapiere ☐ Flüssigkeitskartons/Getränkekartons ☐ Trinkhalme ☐ Sonstige (bitte benennen):	
Bei welcher Sortierstufe erfolgt deren Abtrennung (z. B. manuelle Nachsortierung)?	
Wie groß ist deren Anteil?	
3.3	Gibt es einen Feinsortierrest?
☐ ja ☐ nein	
Wenn ja, unterhalb welcher Größe beginnt der Feinsortierrest?	
Wenn ja, wird der Feinsortierrest dem Mischpapier zugegeben oder energetisch verwertet?	
☐ Zugabe Mischpapier ☐ Energetische Verwertung ☐ Sonstiges (bitte benennen):	

Erhebungsbogen PPK-Sortieranlagen

4 Einschätzung zur Sortierbarkeit						
4.1 Welche Verpackungsmerkmale erschweren die Sortierung in der sensorgestützten Sortierung?						
Beschreibung	Problem unbekannt	Problem nicht gelöst, aber aufgrund geringer Mengenrelevanz bedeutungslos	Problem technisch		kein Problem	Bemerkung
			weitgehend gelöst	nicht gelöst		
Schwarz durchgefärbt unter Verwendung rußbasierter Pigmente	☐	☐	☐	☐	☐	Ist eine graue Farbgestaltung mit rußbasierten Pigmenten problematisch?
Lackierte Oberfläche	☐	☐	☐	☐	☐	
Kunststoffbeschichtete Oberfläche	☐	☐	☐	☐	☐	
Thermopapieretiketten	☐	☐	☐	☐	☐	
Kunststoff-Faser-Gemische (z. B. mit Nassfestmittel)	☐	☐	☐	☐	☐	
Metallisierte Oberfläche	☐	☐	☐	☐	☐	
Konstruktionsbedingter Restinhalt	☐	☐	☐	☐	☐	Welche Restinhalte bzw. Verpackungen derer sind besonders kritisch?
4.2 Gibt es sonstige kritische Verpackungsmerkmale (auch unter dem Aspekt, dass sie außerordentliche Kosten und/oder außerordentlichen technischen Aufwand verursachen können)? Warum gibt es ggf. Reklamationen?						
Beschreibung	Aufgrund geringer Mengenrelevanz derzeit nicht bedeutend	Problem bekannt, technisch		Erläuterung		
		weitgehend gelöst	nicht gelöst			
	☐	☐	☐			
	☐	☐	☐			
	☐	☐	☐			

A.12 Erhebungsbogen Verwertung von PPK aus der Monoerfassung

Erhebungsbogen Verwerter von PPK aus der Monoerfassung

Bitte senden Sie den Erhebungsbogen ausgefüllt an:

Umweltbundesamt
z. Hd. III 1.6 – Frau Grummt
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau
E-Mail: svenja.grummt@uba.de

Absender
Name: _____
Adresse: _____
Tel./E-Mail: _____

1 Kapazität Ihrer Verwertungsanlage									
Die aktuelle technische Kapazität unter Berücksichtigung der genehmigungsrechtlichen Obergrenze beträgt:									
< 25.000 t/a	25.000 bis 50.000 t/a	50.000 bis 75.000 t/a	75.000 bis 100.000 t/a	> 100.000 t/a					
☐	☐	☐	☐	☐					
2 Inputqualitäten und Produkte									
2.1 Welche Inputqualitäten aus Systemen nach § 3 Abs. 16 VerpackG werden verarbeitet?¹ Hinweis: 1.11.00 Deinkingware zählt nicht zu den Systemmengen.									
1.01	1.02	1.04.xx	1.05.xx	5.02	5.03	510 ²	512 ³	550 ⁴	Sonstige
☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Sonstige bitte näher erläutern:									
2.2 Endprodukte des Recyclingprozesses für Systemmengen aus Deutschland sind:									
Wellpappenrohapiere		Karton oder Pappe		Hygienepapiere		Sonstige			
☐		☐		☐		☐			
Sonstige bitte näher erläutern:									

¹ Die Bedeutung der Nummern kann DIN EN 643 und den Produktspezifikationen der Verpackungsfraktionen der dualen Systeme entnommen werden.

² Produktspezifikation Fraktions-Nr. 510 „Flüssigkeitskartons“.

³ Produktspezifikation Fraktions-Nr. 512 „Flüssigkeitskartons/Getränkekartons“.

⁴ Produktspezifikation Fraktions-Nr. 550 „PPK aus LVP“.

Erhebungsbogen Verwerter von PPK aus der Monoerfassung

2.3 Welche Fraktionen/Sorten werden separat und welche gemeinsam verarbeitet (z. B. PPK aus LVP gemeinsam mit FKN oder anderen Altpapiersorten)?		
Nummer Sorte/Fraktion	Separate Verarbeitung	Gemeinsame Verarbeitung („Rezeptur“)
	☐	☐
	☐	☐
	☐	☐
2.4 Werden im Recyclingprozess aus Gründen der Produktqualität Inputqualitäten aus anderen Herkunftsbereichen gemeinsam mit den Systemmengen („Rezeptur“) verarbeitet?		
☐ nein ☐ Systemmengen ausländischer Herkunft ☐ Gewerbemengen ☐ Produktionsabfälle ☐ Primärrohstoffe ☐ Sonstige (bitte benennen):		
3 Prozesstechnik		
3.1 Welche der folgenden Grundverfahren werden aktuell realisiert?		
Grundverfahren	ja	Bemerkungen
Vorzerkleinerung	☐	
Stofflösung (ggf. Angabe, ob Pulper oder Trommel)	☐	
Faserrückgewinnung aus Rejekten der primären Stofflösung	☐	
Sortier- und Reinigungsstufen zur Faserstoffaufbereitung	☐	
Sieb-/Press-/Trockenpartie	☐	
Alternative und additive Prozessstufen (z. B. Hygienisierung)	☐	Falls ja, bitte Grundoperation angeben:
3.2 Wie lang ist die Stofflösezeit und bei welcher Temperatur erfolgt diese ungefähr?		
	min	°C

Erhebungsbogen Verwerter von PPK aus der Monoerfassung

3.3 Im Rahmen der Sortier- und Reinigungsstufen der Faserstoffaufbereitung bei Einsatz aus Systemmengen sollen folgende Komponenten als Störstoffe in die Rejekte ausgeschleust werden:						
☐ feinkörnige mineralische Verunreinigungen (Sand, Steine, Glassplitter) ☐ Kunststoffpartikel ☐ Makrostickets ☐ Stippen ☐ Kurzfasern ☐ Füllstoffe ☐ Streichfarben ☐ Sonstige (bitte benennen):						
3.4 Wie hoch ist die Maximaltemperatur der Trockenzylinder bei der Papiertrocknung ungefähr?						
				°C		
4 Einschätzung zu potentiell recyclingunverträglichen Verpackungskomponenten oder -ausführungen						
4.1 Welche gestalterischen Verpackungsattribute erachten Sie für Ihre Rezyklatqualitäten als kritisch?						
Beschreibung	Problem unbekannt	Problem nicht gelöst, aber aufgrund geringer Mengenrelevanz bedeutungslos	Problem bekannt, technisch		kein Problem	Bemerkung
			weitgehend gelöst	nicht gelöst		
Nicht wasserlösliche oder nicht redispersierende Klebstoffapplikationen	☐	☐	☐	☐	☐	
Komponenten der EuPIA (Exclusion list for printing inks and related products)	☐	☐	☐	☐	☐	
4.2 Gibt es sonstige kritische Verpackungsattribute (auch unter dem Aspekt, dass sie außerordentliche Kosten und/oder einen hohen technischen Aufwand verursachen können)? Warum gibt es ggf. Reklamationen?						
Beschreibung	Aufgrund geringer Mengenrelevanz derzeit nicht bedeutend	Problem bekannt, technisch		Erläuterung		
		weitgehend gelöst	nicht gelöst			
	☐	☐	☐			
	☐	☐	☐			
	☐	☐	☐			

A.13 Erhebungsbogen Glasaufbereitung

Erhebungsbogen Glasaufbereiter

Bitte senden Sie den Erhebungsbogen ausgefüllt an:

Umweltbundesamt

z. Hd. III 1.6 – Frau Grummt

Wörlitzer Platz 1

06844 Dessau-Roßlau

E-Mail: svenja.grummt@uba.de

Absender

Name: _____

Adresse: _____

Tel./E-Mail: _____

1 Kapazität Ihrer Verwertungsanlage				
Die aktuelle technische Kapazität unter Berücksichtigung der genehmigungsrechtlichen Obergrenze beträgt:				
< 25.000 t/a	25.000 bis 50.000 t/a	50.000 bis 75.000 t/a	75.000 bis 100.000 t/a	> 100.000 t/a
☐	☐	☐	☐	☐
2 Inputqualitäten und Produkte				
2.1 Welche Inputqualitäten aus Systemen nach § 3 Abs. 16 VerpackG werden verarbeitet? ¹				
100	101	102	103	104
☐	☐	☐	☐	☐
2.2 Endprodukte des Recyclingprozesses für Systemmengen aus Deutschland sind:				
Glasscherben nach T120		Sonstige		
☐		☐		
Sonstige bitte näher erläutern:				
2.3 Die Endprodukte des Recyclingprozesses unter Einsatz von Systemmengen aus Deutschland werden überwiegend in folgende Anwendungen vermarktet (Mehrfachnennung bei Relevanz möglich):				
☐ keine Aussage / unbekannt ☐ Behälterglas ☐ Sonstige (bitte benennen):				

¹ Gefragt ist hier nach den unterschiedlichen Qualitäten aus der Glaserfassung. Die Bedeutung der Artikelnummern kann wme.fact entnommen werden.

Erhebungsbogen Glasaufbereiter

3 Prozesstechnik						
Welche der folgenden Grundverfahren werden aktuell realisiert?						
Grundverfahren	ja	Bemerkungen				
Zerkleinerung	☐					
Magnetscheidung	☐					
NE-Abscheidung (Wirbelstromscheidung und/oder Induktionsscheider)	☐					
Trocknung (thermisch)	☐					
Mechanische Etikettenentfernung (inkl. Trommeltrockner)	☐					
Abtrennung von Keramikscherben, Steinen und Porzellan (KSP-Trenner) im Durchlichtverfahren	☐					
Optische Trennung zur Farbseparation im Durchlichtverfahren	☐					
Separation von bleihaltigen Scherben	☐					
Separation von hitzebeständigen Scherben	☐					
Alternative und wesentliche additive Prozessstufen (z. B. NIR-Sensoren)	☐	Falls ja, bitte Grundoperation angeben:				
4 Einschätzung zu potentiell recyclingunverträglichen Verpackungskomponenten oder -ausführungen						
4.1 Welche gestalterischen Verpackungsattribute erachten Sie für Ihre Rezyklatqualitäten als kritisch?						
Beschreibung	Problem unbekannt	Problem bekannt, aber aufgrund geringer Mengenrelevanz bedeutungslos	Problem bekannt, technisch		kein Problem	Bemerkung
			weitgehend gelöst	nicht gelöst		
Blei aus Kristallglasverpackungen	☐	☐	☐	☐	☐	
Barium aus Kristallglasverpackungen	☐	☐	☐	☐	☐	
Bügelverschlüsse mit ausschließlich nicht-ferromagnetischen Metallanteilen	☐	☐	☐	☐	☐	
Glasverpackungen ohne Transparenz/Transluzenz, z. B. lackierte Gläser	☐	☐	☐	☐	☐	

Erhebungsbogen Glasaufbereiter

Ausguss-Einsätze aus Kunststoff ²	☐	☐	☐	☐	☐
4.2 Gibt es sonstige kritische Verpackungsattribute (auch unter dem Aspekt, dass sie außerordentliche Kosten und/oder außerordentlichen technischen Aufwand verursachen können)? Was verursacht ggf. Reklamationen?					
Beschreibung	Aufgrund geringer Mengenrelevanz derzeit nicht bedeutend	Problem bekannt, technisch		Erläuterung	
		weitgehend gelöst	nicht gelöst		
	☐	☐	☐		
	☐	☐	☐		
	☐	☐	☐		
	☐	☐	☐		
	☐	☐	☐		

² Bitte unterscheiden Sie: wirkt sich der Einsatz negativ auf die Qualität des Scherben-Outputs aus oder führt er „lediglich“ zu Glasverlusten?

B Auswertung der Erhebungsbögen und des Fragenkatalogs

B.1 Auswertung LVP-Sortieranlagen

Nicht öffentlich aufgrund von Betriebs- und Geschäftsgeheimnissen.

B.2 Auswertung Kunststofffolien-Verwertung

Nicht öffentlich aufgrund von Betriebs- und Geschäftsgeheimnissen.

B.3 Auswertung PP-Verwertung

Nicht öffentlich aufgrund von Betriebs- und Geschäftsgeheimnissen.

B.4 Auswertung PE-Verwertung

Nicht öffentlich aufgrund von Betriebs- und Geschäftsgeheimnissen.

B.5 Auswertung MPO- und PO-flex-Verwertung

Nicht öffentlich aufgrund von Betriebs- und Geschäftsgeheimnissen.

B.6 Auswertung PS-Verwertung

Nicht öffentlich aufgrund von Betriebs- und Geschäftsgeheimnissen.

B.7 Auswertung PET-Verwertung

Nicht öffentlich aufgrund von Betriebs- und Geschäftsgeheimnissen.

B.8 Auswertung Aluminiumaufbereitung und -verwertung

Nicht öffentlich aufgrund von Betriebs- und Geschäftsgeheimnissen.

B.9 Auswertung Weißblechaufbereitung und -verwertung

Nicht öffentlich aufgrund von Betriebs- und Geschäftsgeheimnissen.

B.10 Auswertung FKN- und PPK aus LVP-Verwertung

Nicht öffentlich aufgrund von Betriebs- und Geschäftsgeheimnissen.

B.11 Auswertung PPK-Sortieranlagen

Nicht öffentlich aufgrund von Betriebs- und Geschäftsgeheimnissen.

B.12 Auswertung Verwertung von PPK aus der Monoerfassung

Nicht öffentlich aufgrund von Betriebs- und Geschäftsgeheimnissen.

B.13 Auswertung Glasaufbereitung

Nicht öffentlich aufgrund von Betriebs- und Geschäftsgeheimnissen.