



Fraunhofer
UMSICHT



REUSE VS. RECYCLE

Vergleich von Energie- und Wasserverbrauch
und Zirkularität bei der Kreislaufführung von
Einweg- und Mehrwegverpackungen

REUSE VS. RECYCLE

VERGLEICH VON ENERGIE- UND WASSERVERBRAUCH UND ZIRKULARITÄT BEI DER KREISLAUFFÜHRUNG VON EINWEG- UND MEHRWEGVERPACKUNGEN

Autoren:	Lena Bersch, Jürgen Bertling, Jan Blömer
Kontakt:	Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT Osterfelder Straße 3, 46047 Oberhausen www.umsicht.fraunhofer.de Ansprechpartner: Jürgen Bertling juergen.bertling@umsicht.fraunhofer.de
Auftraggeber:	Stiftung Initiative Mehrweg Taubenstraße 26, 10117 Berlin Ansprechpartner: Jens Oldenburg j.oldenburg@stiftung-mehrweg.de
Titelfoto:	Es handelt sich um ein Symbolbild. Kisten und Becher werden üblicherweise nicht gemeinsam in der gleichen Reinigungsanlage gewaschen. ©Jürgen Bertling
Ausgabe:	November 2025
Im Internet verfügbar:	publica.fraunhofer.de DOI: 10.24406/publica-6370
Nutzungsbedingung:	CC-BY-NC-SA 4.0
Zitierweise:	Bersch, L.; Bertling, J.; Blömer, J.: Reuse vs. Recycling: Vergleich von Energie- und Wasserverbrauch und Zirkularität bei der Kreislaufführung von Einweg- und Mehrwegverpackungen. Oberhausen/Sulzbach-Rosenberg. DOI: 10.24406/publica-6370
Beiträge (CRediT):	Lena Bersch (Conceptualization, Data Analysis, Investigation, Methodology, Writing – original draft, Writing – review and editing), Jürgen Bertling (Conceptualization, Data Analysis, Investigation, Methodology, Writing – original draft, Writing – review and editing, Project administration, Supervision), Jan Blömer (Conceptualization, Data Analysis, Investigation, Methodology, Writing – original draft)

Finanzierung, Verantwortlichkeit und Nutzungsbedingungen	3
Wie es nach dieser Studie weitergehen könnte...	4
Abkürzungsverzeichnis	5
Executive Summary	6
1 Einleitung	8
1.1 Hintergrund und Ziel der Studie	8
1.2 Methodik	9
1.3 Anmerkungen zur Bewertung anhand von Sachbilanzdaten vs. ökobilanzieller Wirkungskategorien	9
1.3.1 Wasserverbrauch	9
1.3.2 Energiebedarf	11
1.4 Limitationen der Betrachtung	12
1.5 Verwendete Demonstratoren	12
1.5.1 To-go-Becher	13
1.5.2 Boxen (Kisten, Kartons, Steigen)	15
2 Gesetzliche Anforderungen und Normen zur Herstellung, Nutzung und Reinigung für Verpackungen mit Lebensmittelkontakt	18
2.1 Verpackungen aus Kunststoff	19
2.2 Verpackungen aus PPK	22
2.3 Spezifische Hygieneanforderungen an Mehrwegverpackungen	22
2.4 Schlussfolgerungen hinsichtlich der Regulierungstiefe verschiedener Verpackungstypen und der Vergleichbarkeit der Systeme	24
3 Grundlagen der Kontamination und Dekontamination in der Kreislaufwirtschaft	27
3.1 Verunreinigungen und Reinigung von Kunststoff-Mehrwegverpackungen	27
3.2 Verunreinigungen und Reinigung von Kunststoff-Rezyklaten	29
3.3 Reinigungsrelevante Materialeigenschaften – Spülmaschinen- und Recyclingfestigkeit	31
3.4 Kontamination und Dekontamination beim Papierrecycling	33
4 Vergleich der Systeme	37
4.1 Die Rückführung in den Systemen	37
4.2 Umrechnung auf gleiche Bezugsgrößen	38
4.2.1 Umrechnung auf den Output des Gesamtsystems	38
4.2.2 Umrechnung auf das Nennvolumen als Bezugsgröße	39
4.3 Kreislaufführung von Einwegverpackungen aus Kunststoff	42
4.3.1 Generische Betrachtung zu Leichtverpackungen (LVP)	42

4.3.2	Generische Betrachtung zu getrennt gesammelten Kunststoffeinwegabfällen	48
4.3.3	Einwegbecher aus PP, PS und PET	48
4.4	Kreislaufführung von Einwegverpackungen aus PPK	49
4.4.1	Generische Betrachtung – PPK	49
4.4.2	Einwegbecher aus PPK	54
4.4.3	Einwegboxen aus PPK	57
4.5	Kreislaufführung im Mehrwegkreislauf	58
4.5.1	Generische Betrachtung des Mehrwegkreislaufes	58
4.5.2	Mehrwegbecher aus Kunststoff	61
4.5.3	Mehrwegboxen aus Kunststoff	65
5	Vergleich der Wasser- und Energieverbräuche sowie Zirkularität der beiden Optionen für die Kreislaufschließung	69
5.1	Tabellarischer Gesamtüberblick	69
5.2	Vergleich von Einweg-Boxen aus PPK mit Mehrweg-Boxen aus Kunststoff	70
5.3	Vergleich von Einweg-Getränkebechern aus PPK bzw. PP mit Mehrweg-Getränkebechern aus Kunststoff	71
5.4	Energie und Wasserverbräuche unter Berücksichtigung der erreichten Zirkularität	72
5.5	Vergleich der Untersuchungsergebnisse von Mehrwegbechern und -boxen	75
6	Fazit und Empfehlungen	76
6.1	Zur Studie	76
6.2	Zur rechtlichen Lage von Einweg und Mehrweg	77
6.3	Kontamination und Dekontamination im Verpackungskreislauf	79
6.4	Prozesse und Anlagen zur Kreislaufführung	80
6.5	Vergleich der Energie- und Wasserverbräuche zwischen den Systemen	81
6.6	Förderung von Mehrwegverpackungen	82
7	Anhang A – Glossar	84
8	Anhang B – Interviewpartner	84
9	Anhang C – Diverse Berechnungen	85
10	Literaturverzeichnis	87

Finanzierung, Verantwortlichkeit und Nutzungsbedingungen

Die Erstellung des vorliegenden Berichts wurde von der Stiftung Initiative Mehrweg (SIM) beauftragt. Es wurden Literatur und statistische Daten ausgewertet sowie Anlagenbesichtigungen und Interviews durchgeführt. Der Bericht stellt eine wissenschaftliche Meinungsäußerung dar, die sich auf verfügbare Daten stützt, in der Interpretationen aber auch normativen Charakter besitzen. Experimente oder eigene Datenerhebungen wurden nicht durchgeführt, sind aber zum Teil in der zitierten Literatur enthalten. Die Aussagen und Methoden in diesem Bericht betreffen Ökobilanzen, der Bericht selbst ist aber keine Ökobilanz und erfüllt demnach auch keine entsprechenden Standards (bspw. ISO 14040, ISO 14067 etc.)

In der Formulierung des Berichts waren die Autor*Innen frei; eine Einflussnahme durch die Auftraggeberin, befragte Expert*Innen oder andere Dritte fand nicht statt. Dennoch hatte die Auftraggeberin die Möglichkeit, Vorversionen des Berichts in einem Durchgang kritisch zu kommentieren. Die Ergebnisse des Berichts stellen nicht in jedem Fall die Sicht des Auftraggebers oder des Fraunhofer-Instituts UMSICHT dar, sondern in erster Linie die Sichtweise der beteiligten Autor*Innen. Ein interner Reviewprozess fand am Fraunhofer UMSICHT statt.

Fraunhofer haftet nicht für Verluste oder Schäden, die Dritten dadurch entstehen, dass diese sich auf die in diesem Bericht enthaltenen Informationen verlassen, ohne die Unsicherheiten dieser wissenschaftlichen Meinungsäußerung angemessen zu berücksichtigen.

Referenzierungen dieser Studie sollten sich nicht auf isolierte Textpassagen beziehen, sondern ausreichend und sinngemäß kontextualisiert sein und mit einem Verweis auf den vollständigen Bericht versehen werden. Das Werk ist in allen seinen Teilen urheberrechtlich geschützt. Des Weiteren ist es unter einer Creative-Commons-Lizenz verfügbar (CC-BY-NC-SA 4.0 DE; Download-Link und Zitierweise siehe Bibliografische Daten auf Seite I dieses Berichts). Das Werk oder Teile davon dürfen für nicht-kommerzielle Zwecke vervielfältigt, verbreitet und öffentlich zugänglich gemacht werden, sofern auf die Urheber*innen (Autor*innen, Herausgebende) verwiesen wird. Im Falle einer Verbreitung sind die gleichen Lizenzbedingungen, unter welche dieses Werk fällt, anzuwenden. Jede kommerzielle Verwertung ohne schriftliche Genehmigung der Autor*innen ist unzulässig.

Wie es nach dieser Studie weitergehen könnte...

Die vorliegende Studie bewertet den Energie- und Wasserverbrauch sowie die erreichte Zirkularität von Einweg- und Mehrwegverpackungen auf Basis von Literaturdaten, Statistiken und Interviews. Als Fraunhofer-Institut mit ausgewiesener Erfahrung in der ökologischen, ökonomischen und technischen Bewertung von Prozessen, Produkten und Dienstleistungen verstehen wir uns dabei nicht nur als neutral Bewertende, sondern auch als Brückenbauende zwischen Technologieentwicklung, Bewertung und Umsetzung. Unsere Analysen sind eng in das technische Know-how von Fraunhofer UMSICHT eingebettet und tragen so zu einer formativen Evaluation bei – das heißt: Wir prüfen und bewerten nicht nur rückblickend, sondern zeigen auch frühzeitig Gestaltungsoptionen auf, an deren Umsetzung wir uns in nachfolgenden Projekten auch beteiligen können.

Im Kontext von Wiederverwendung und Recycling – dem Thema dieser Studie – forscht Fraunhofer UMSICHT an neuen Technologien zur Wassereinsparung und -aufbereitung, modernen Energiekonzepten zur Erzeugung und Speicherung von regenerativen Energien sowie branchenübergreifenden Lösungen unter Berücksichtigung spezifischer Standortfragen. Wir optimieren fossile und biobasierte Kunststoffe, um in Mehrweganwendungen eine hohe Lebensdauer und Spülfestigkeit zu erreichen. Gleichzeitig entwickeln wir verbesserte thermochemische und mechanische Recyclingprozesse für Kunststoffe und andere komplexe Abfallgemische. Unsere Designer gestalten kreislauffähige Produkte, wobei avancierte Studien zum Nutzungsverhalten die Arbeitsgrundlage bilden. Bei der Einführung neuer Produkte und Technologien prüfen wir gesellschaftliche Akzeptanz, wirtschaftliche Erfolgsaussichten und - wie in dieser Studie - Aspekte der ökologischen Nachhaltigkeit.

Ansprechpartner für weiterführende FuE-Aktivitäten: Jochen Nühlen
jochen.nuehlen@umsicht.fraunhofer.de

Abkürzungsverzeichnis

BfR	Bundesinstitut für Risikobewertung
BYO	Bring-your-own System
BPA	Bisphenol A
DEHP	Diethylhexyl Phthalate
DIN	Deutsche Industrie Norm
EFSA	Europäischen Behörde für Lebensmittelsicherheit
EPS	Expandiertes Polystyrol
EU	Europäische Union
FEFCO	Europäischer Verband der Produzenten von Wellpappe
GMP- Verordnung	Kommissionsverordnung zur guten Herstellungspraxis EU 2023/2006
(r)HDPE	(recycltes) High-Density Polyethylen
IV	intrinsische Viskosität
KLT	Kleinladungsträger
(r)LDPE	(Recycltes) Low-Density Polyethylen
LVP	Leichtverpackung (Abfallfraktion)
MOAH	Aromatische Mineralölkohlenwasserstoffe
MOH	Mineral Oil Hydrocarbons
MOSH	Gesättigte Mineralölkohlenwasserstoffe
Mt	Megatonne
PC	Polycarbonat
PCR	Post-Consumer-Rezyklat
PE	Polyethylen
PES	Polyethersulfon
(r)PET	(recycltes) Polyethylenterephthalat
PLA	Polylactid
(r)PP	(recycltes) Polypropylen
PPK	Papier, Pappe, Karton
PPWR	EU-Verordnung 2025/40 über Verpackungen und Verpa- ckungsabfälle
PS	Polystyrol
PSU	Polysulfon
PVC	Polyvinylchlorid
TPE	Thermoplastische Elastomere

Executive Summary

- 1) Die Datenlage zur Kreislaufführung von Einweg- und Mehrweg-Verpackungen in Deutschland ist unzureichend. Ökobilanzen nutzen daher häufig veraltete und unspezifische Daten. Der Wandel zur Circular Economy braucht aber eine solide Datenbasis. Ein Monitoring und die Verfügbarmachung von validen und detaillierten Daten zu Einweg- und Mehrwegsystemen sind daher erforderlich.
- 2) Kunststoffe aus Rezyklaten sind stärker reguliert als Verpackungen aus Pappe bzw. Karton, dies trotz erheblicher Bedenken hinsichtlich der Eignung von Altpapier für den Lebensmittelkontakt. Stand heute finden Sekundärmaterialien in Verpackungen für den Lebenskontakt keine nennenswerte Anwendung. Mehrwegsysteme hingegen sind aufgrund standardisierter Reinigungsprozesse und nachvollziehbarer Lebenswege im Lebensmittelkontakt erfolgreich etabliert.
- 3) Das Spülen von Mehrwegboxen benötigt selbst bei schwierigen Gütern nur ca. 20 % der Endenergie und des Frischwassers von Boxen aus recycelter Pappe. Bei wenig verschmutzten Kisten bspw. für Obst oder Gemüse erhöht sich der Vorteil weiter. Mehrwegbecher schneiden im Vergleich zu Einwegbechern aus Pappe bei Endenergie und Frischwasserbrauch besser ab (ca. 50 %) und bei Energie auch besser als Kunststoff-Einwegbecher, letztere benötigen allerdings weniger Wasser bei der Kreislaufführung.
- 4) Trotz der hohen Aufwände beim Recycling sind die Kreislaufverluste der Einweglösungen deutlich höher (17 bis 100 %), eine Eignung für den Lebensmittelkontakt wird kaum erreicht, höhere mech. Anforderungen nur bei geringen Rezyklatanteilen und selbst beim Downcycling gehen aufgrund von Sammel-, Sortierverlusten und Materialdegradation relevante Mengen verloren (bei Bechern sogar ca. 80 %). Bei den Mehrwegboxen liegen die Verluste hingegen im unteren einstelligen Bereich (unter 3 %). Mehrwegbecher können in geschlossenen Anwendungen (Events etc.) ähnlich gute Werte erreichen. In offenen Anwendungen (To-go-Gastronomie), sind die Werte aufgrund einer unzureichenden Marktabdeckung derzeit aber noch hoch (bis ca. 60 %).
- 5) Politische Maßnahmen sollten auf stoffgruppenübergreifende Mehrwegquoten und deren aktive Durchsetzung abzielen. Förderpolitisch sollte Forschung zu Mehrweg, Langlebigkeit, Pooling und effizienten Reinigungsverfahren vermehrt in den Forschungsagenden Berücksichtigung finden.

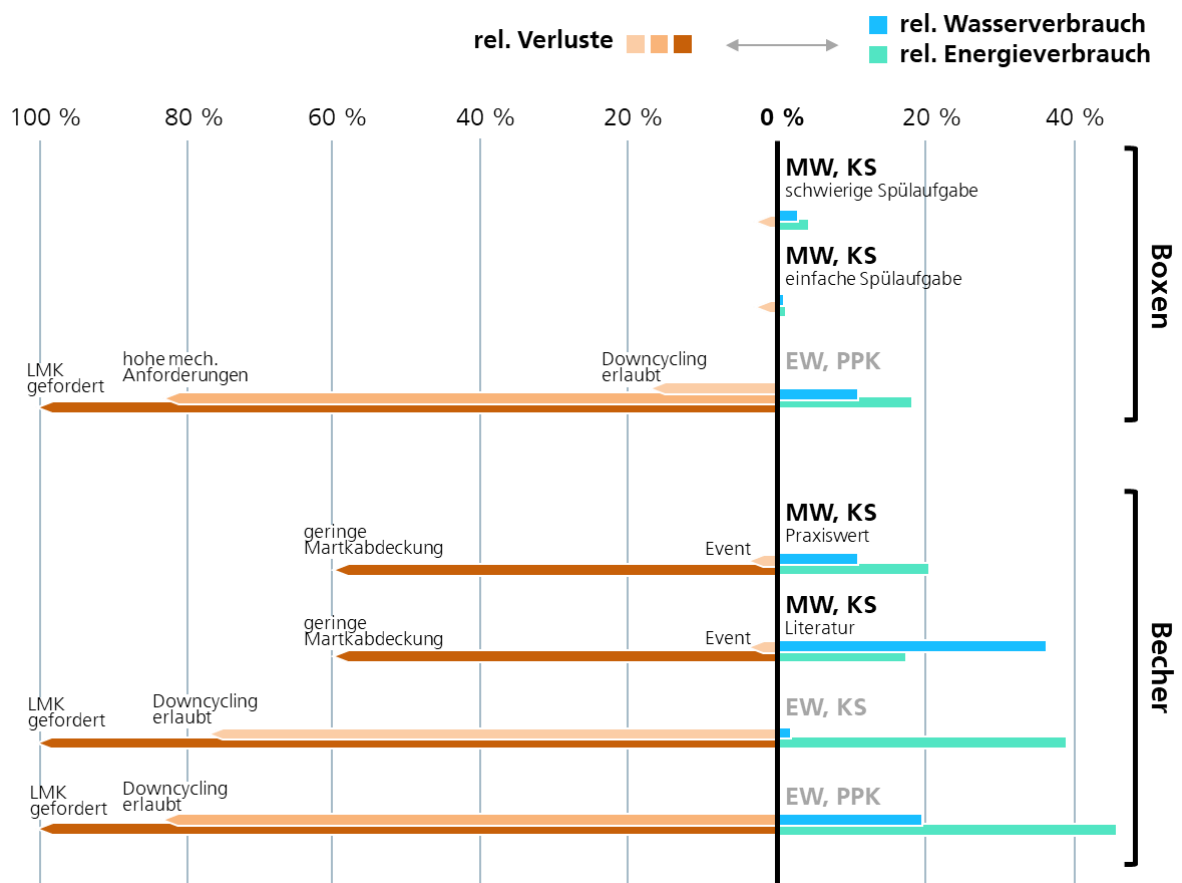


Bild 1: Darstellung der Ergebnisse aus dem Vergleich verschiedener Mehr- und Einwegsysteme. Die oberen drei Balkengruppierungen betreffen Boxen für Obst, Gemüse, Fleisch etc., die unteren umfassen vier Becher für To-go-Getränke. Auf der rechten Seite sind die relativen Verbräuche aufgetragen: grün – Endenergie, blau – Frischwasser. Der Prozentwert entspricht dem Verhältnis zu einer als Referenz festgelegten Handspülung. Auf der linken Seite sind die relativen Verluste als farbliche Abstufungen in orange dargestellt. Relative Verluste entsprechen dem Teil des Stoffstroms, der nicht im Kreis geführt wird. Die Verluste der Mehrwegsysteme werden dabei entsprechend höher gewichtet, da Mehrwegverpackungen in der Regel materialintensiver sind. Bei Mehrwegbechern unterscheiden sich vor allem bei Bechern die Verluste je nachdem, ob es sich um ein Event handelt, bei dem die Rückführung einfach ist, oder es sich um eine offene Anwendung mit geringer Marktabdeckung und noch ungenügender Rücklauflogistik handelt. Bei Rezyklaten steigen die Verluste mit den Qualitätsanforderungen je nachdem, ob Downcycling als Verwertungsoption angestrebt wird, es gilt hohe mechanische Anforderungen zu erfüllen oder eine Eignung für den Lebensmittelkontakt gefordert ist. (Details und exakte Werte siehe Langfassung der Studie).

1 Einleitung

1.1 Hintergrund und Ziel der Studie

Energie- und Wasserverbräuche¹ stehen neben Transportaufwand und spezifischen Materialaufwand häufig im Zentrum der Debatten, ob Einweg oder Mehrweg die bessere Systemlösung für Verpackungen ist. Weiterhin bilden diese Daten auch die Grundlage für die Sachbilanz in Ökobilanzen. Der vorliegende Bericht hat das Ziel, den Wissensstand zu den relevanten technischen Prozessen sowie die mit ihnen verbundenen direkten Energie- und Wasserverbräuche bei der Kreislaufschließung zusammenzustellen. Herstellungsaufwände werden hingegen nicht betrachtet. Da perspektivisch die lineare Wirtschaftsweise aus ökologischen und geopolitischen Gesichtspunkten einer zirkulären Wirtschaftsweise weichen muss und daher hohe Umlaufzahlen erreicht werden müssen, ist dies aus Sicht der Autoren eine sinnvolle Fokussierung. Transportaufwände werden ebenfalls nicht betrachtet, da sie von der Verbreitung eines Systems abhängig sind. Ihre detaillierte Betrachtung in einer weiteren Untersuchung wäre nichtsdestotrotz sinnvoll. Bei Einwegverpackungen wird der Kreislauf durch das Recycling geschlossen. Recycling umfasst die Prozessschritte Zerkleinerung, Sortierung, Waschen, Klassierung, Compoundierung und Formgebung. Bei den Mehrwegsystemen wird – solange die Mehrwegverpackung intakt bleibt – der Kreislauf durch Waschprozesse geschlossen. Das Einwegsystem zielt auf den Stofferhalt, das Mehrwegsystem darüber hinaus auch auf den Formerhalt. Die idealtypischen Kreisläufe und der jeweils im Rahmen der Studie betrachtete Bereich sind in Bild 2 dargestellt.

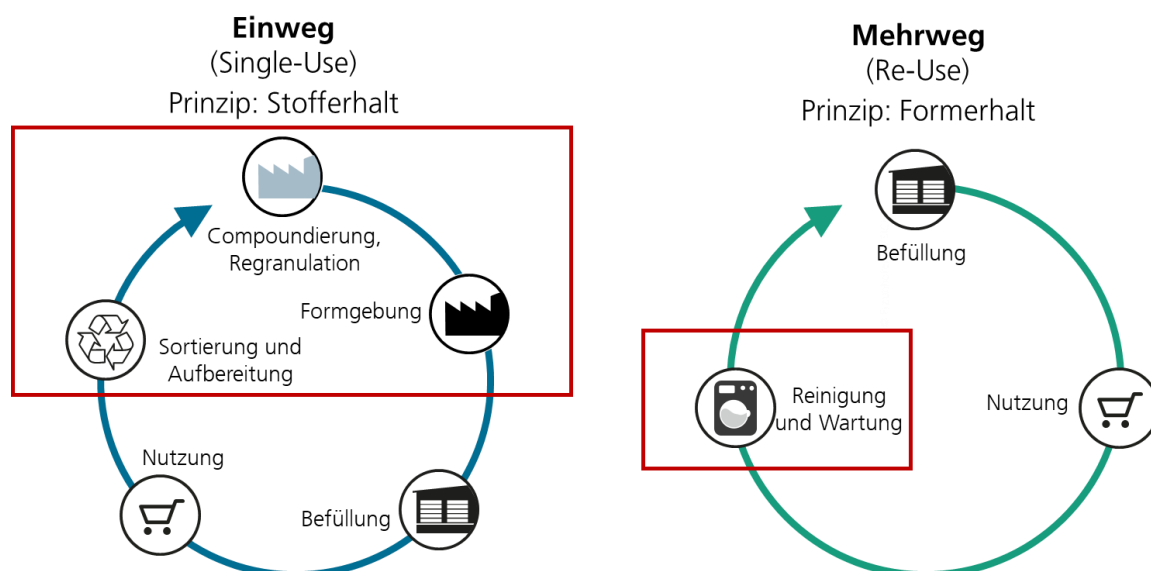


Bild 2: Idealtypische Kreisläufe im Einweg- und Mehrwegsystem; rot umrandet der Bereich, für den in dieser Studie die direkten Energie-, Wasser- und Hilfsmittelverbräuche zusammengestellt wurden. Transportprozesse sind nicht dargestellt [Eigene Darstellung].

¹ Die Begriffe »Energieverbrauch« und »Wasserverbrauch« sind wissenschaftlich nicht korrekt, weil es sich nicht um den Verbrauch – im Sinne von aufbrauchen – handelt, sondern um die jeweils eingesetzte Menge. Da die Begriffe aber in der Praxis etabliert sind, werden sie auch hier, der besseren Verständlichkeit wegen, genutzt.

1.2 Methodik

Für den vorliegende Bericht wurden die **rechtlichen Rahmenbedingungen und der Wissensstand zum Reinigen, zum Energie- und zum Wasserverbrauch** bei der Kreislaufschließung von Einweg- und Mehrkreisläufen zusammengetragen und kritisch evaluiert. Ergänzend wurden für die Mehrwegsysteme **Primärdaten** durch Interviews und Datenerhebungen bei Industrieunternehmen zusammengetragen (siehe Tabelle 16, Anhang 9). Eigene Messkampagnen fanden nicht statt. Die Ergebnisse werden als Verbräuche bezogen auf die Masse des Verpackungsmaterials und die Füllvolumina dargestellt, um eine Vergleichbarkeit herzustellen. Dabei wird auch erreichte Zirkularität berücksichtigt, in dem die Ergebnisse einerseits (vgl. Kapitel 4.2) auf den verwertbaren Output (Sekundärmaterial bzw. gereinigte Mehrwegverpackungen) bezogen werden, zum anderen werden die Energie- und Wasserverbräuche der spezifischen Zirkularität bzw. den Verlusten einer Kreislaufoption direkt gegenübergestellt. Aufgrund der schwachen und heterogenen Datenlage waren statistische Auswertungen nicht möglich, statt Mittelwerten und Spannbreiten wurde daher eine begründete Datenauswahl vorgenommen. Im Rahmen der Auswertung wurden aus den Analysen Handlungsempfehlungen abgeleitet.

1.3 Anmerkungen zur Bewertung anhand von Sachbilanzdaten vs. ökobilanzieller Wirkungskategorien

1.3.1 Wasserverbrauch

Bei der Bestimmung und Bewertung des Wasserverbrauchs kann es sehr leicht zu Missverständnissen kommen, da es je nach Bewertungstiefe (reine Sachbilanz oder Wirkungsabschätzung in einer Ökobilanz) und Herangehensweise unterschiedliche Grundlagen und Sichtweisen gibt. Ein naheliegender Ansatz zur Bestimmung des Wasserverbrauchs ist es, die dem Prozess zur Erfüllung einer Aufgabe zugeführte absolute Wassermenge, d. h. den Frischwasserbedarf zu bestimmen und als Maß zu verwenden. In der Regel wird ein großer Teil dieser Wassermenge als Abwasser wieder abgegeben (bis auf Wasser, das im Produkt verbleibt oder verdunstet). Aus ökobilanzieller Sicht entspricht die Betrachtung sämtlicher relevanter In- und Outputs dem Sachinventar.

In Ökobilanzen wird weiterhin der Frischwasserbezug genauer analysiert; hierbei werden verschiedene Wasserquellen und die allgemeine Verfügbarkeit (»Scarcity«) von Wasser in der betrachteten Region einbezogen. Unterschieden wird hierbei z. B. zwischen Oberflächenwasser, Grundwasser, fossilem Wasser. Bild 3 zeigt einen schematischen Waschprozess, der 1000 Kilogramm Wasser eines deutschen »Wassermixes« benötigt und 100 kg Wasser verdunstet. 900 kg werden als Abwasser abgegeben. Zusätzlich benötigt der Prozess noch 58 kWh elektrische Energie (dies entspricht der Erwärmung von 1000 kg Wasser um 50 °C). Eine Auswertung mittels des AWARE-Modells zur Charakterisierung der Umweltwirkungen der Wassernutzung (AWARE)², wie es auch bei der Berechnung von Produktökobilanzen nach europäischen Bewertungsstandard (PEF 3.1)³ angewandt wird, würde in diesem Fall eine Wasseraufnahme von

² Das AWARE-Modell (»Available WAter REmaining«) ist ein Charakterisierungsansatz in der Ökobilanz, der für jede Region ermittelt, wie viel verfügbares Süßwasser nach Berücksichtigung menschlicher und ökologischer Bedürfnisse übrigbleibt, sodass Entnahmen anhand ihres Beitrags zur regionalen Wasserknappheit bewertet werden können.

³ PEF 3.1: seit Juli 2022 gültige Referenzversion der EU-Methode »Product Environmental Footprint« mit aktualisierten Charakterisierungsfaktoren und harmonisierter EF-Datenbank als Pflichtgrundlage für PEF/OEF-Studien.

1372 Litern ausweisen, da die Wasserverfügbarkeit in Deutschland bezogen auf den Weltdurchschnitt leicht unterdurchschnittlich ist. Die Wasserabgabe würde 1210 kg betragen. In einer Ökobilanz würde dementsprechend ein Wasserverbrauch von 162 kg in die Bewertung eingehen (Bild 3). Darüber hinaus ist zu sehen, dass der Bezug der elektrischen Energie einen zusätzlichen Wasserverbrauch von 665 kg verursacht. Dieser Verbrauch fällt allerdings nicht an der Produktionsstätte an, sondern bei der Erzeugung des Stroms und in noch weiter vorgelagerten Prozessen (Brennstoffbereitstellung, Herstellung von PV und Windanlagen usw.). Aufgrund der Integration von nicht oder nur begrenzt beeinflussbaren Hintergrundprozessen sowie der fehlenden Regionalisierung von Daten ist eine Ökobilanz nur bedingt zur Beurteilung von Standortfragen bzw. als Grundlage für die Prozessoptimierung geeignet.

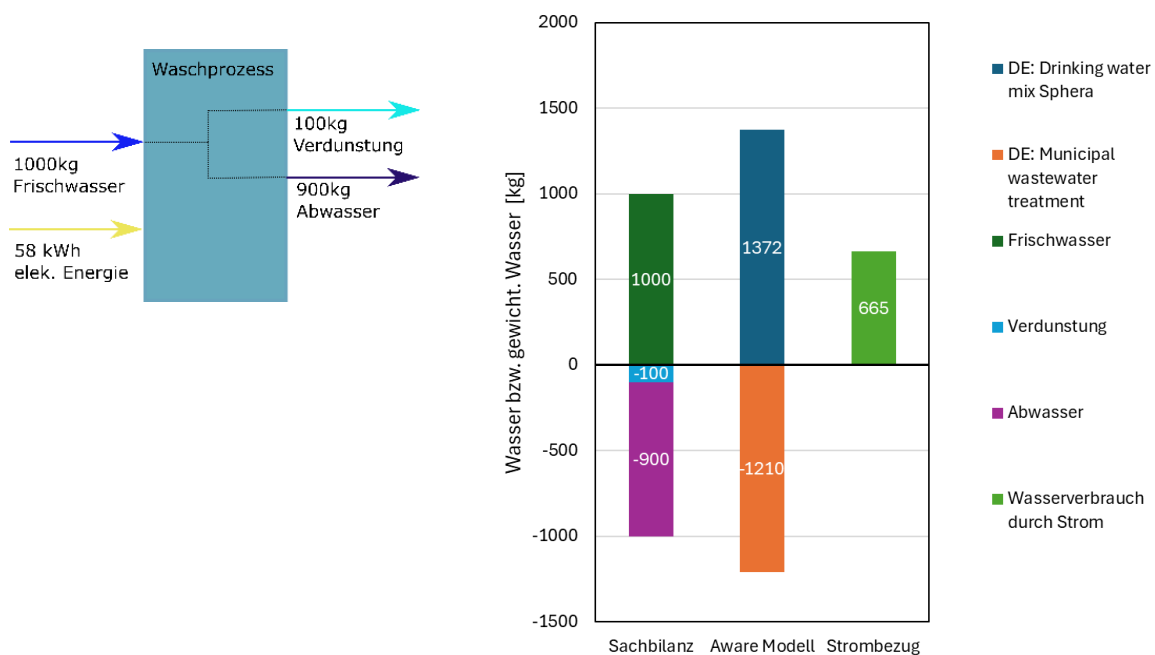


Bild 3: Schematischer Waschprozess und Vergleich verschiedener Darstellungen des Wasserverbrauchs [Eigene Darstellung]

Aus ökobilanzieller Sicht ist diese Bewertung nachvollziehbar und richtig, da Nettobelastungen der Umwelt berechnet werden sollen. Allerdings widerspricht dies einerseits der intuitiven Wahrnehmung der Wasserverbrauchenden, andererseits fehlt damit ein ökologischer Anreiz sparsam mit Wasser umzugehen. Dies erscheint z. B. vor dem Hintergrund der ausgeprägten Niederschlagsdefizite im Frühjahr 2025 und der prognostizierten Zunahme solcher Trockenperioden relevant.⁴

Der europäische Verband der Produzenten von Wellpappe (FEFCO) weist für die Wellpappen-Herstellung (bezogen auf 1 t Produkt) beim Wasser die Aufnahme und Differenz sehr transparent getrennt aus (Aufnahme 13,55 m³, Differenz 1,07 m³) (FEFCO 2018) (weitere Details siehe Kap 5.3). Allerdings wird oft nur

⁴ <https://www.umweltbundesamt.de/themen/wasser/extremereignisse/klimawandel/trockenheit-in-deutschland-fragen-antworten#trockenheit-aktuelle-situation>
<https://www.sciencemediacenter.de/angebote/fruehjahrstrockenheit-2025-in-deutschland-mit-trockenstress-in-den-sommer-25070>
<https://www.dvgw.de/der-dvgw/aktuelles/presse/presseinformationen/dvgw-presseinformation-vom-16042025-trockenheit-und-wasserversorgung>

die Wasserdifferenz in der Kommunikation genutzt. Nach dieser Logik würde jedoch die Reinigung von Mehrwegverpackungen – abgesehen von Trocknungs- bzw. Verdunstungsverlusten – ebenfalls praktisch kein Wasser verbrauchen.

Aus diesen Gründen wird in dieser Studie die reine Frischwasseraufnahme eines Prozesses als maßgeblich für dessen Bewertung herangezogen. Bild 4 zeigt die Zusammenhänge und Unterschiede in der Betrachtungsweise nochmals schematisch.

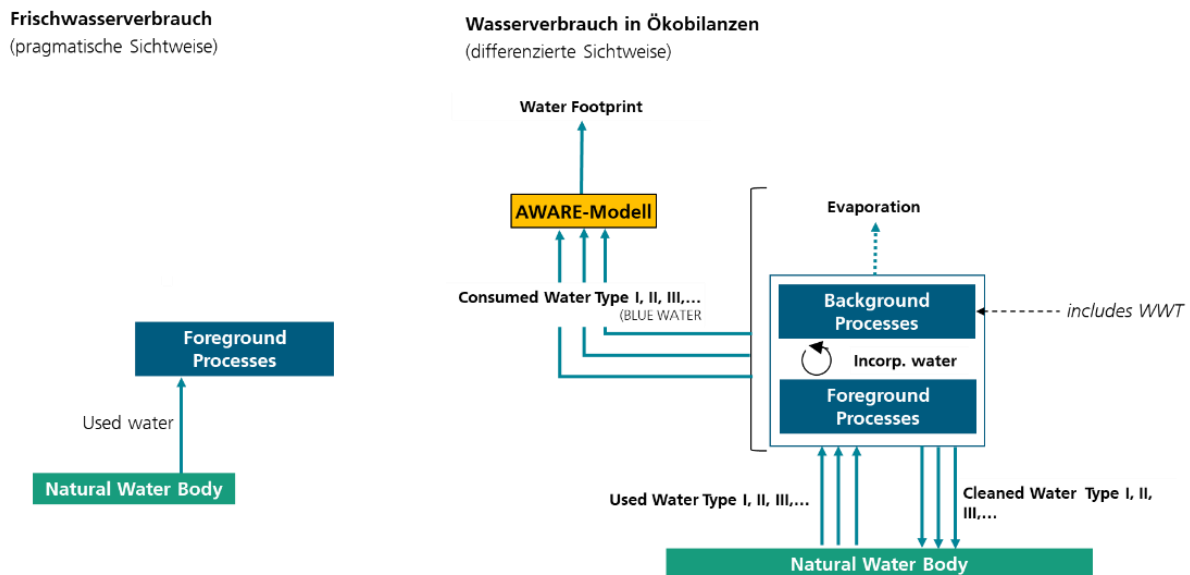


Bild 4: Frishwasserverbrauch vs. ökobilanzielle Betrachtung des Wasserverbrauchs [Eigene Darstellung]

1.3.2 Energiebedarf

Auch bei der Bestimmung und Bewertung des Energiebedarfs treten leicht Missverständnisse auf, da je nach Methodik unterschiedliche Systemgrenzen und Kennzahlen verwendet werden. Üblicherweise wird in Ökobilanzen nicht der Endenergiebedarf, sondern zusätzlich die vorgelagerte Bereitstellungskette bis hin zum Rohstoffabbau berücksichtigt. Dazu werden der Primärenergiebedarf oder der kumulierte Energieverbrauch (KEV) herangezogen, welche zusätzlich zur tatsächlich verbrauchten Endenergie auch die Umwandlungs- und Übertragungsverluste in den Energiesystemen abbilden.

Für die Beurteilung der Kreislaufführung von Verpackungen ist es jedoch naheliegend, zunächst die dem Prozess unmittelbar zugeführte Energie – also den Endenergiebedarf – zu bestimmen und als Maß zu verwenden. Dies entspricht aus sachbilanztechnischer Sicht der tatsächlich gemessenen Energiemenge, die z. B. in Form von Strom oder Erdgas in einer Recycling- oder Reinigungsanlage eingesetzt wird.

Die Verwendung von Primärenergie- oder KEV-Werten liefert aus ökobilanzieller Perspektive ein differenzierteres Bild, da damit auch vorgelagerte Umwandlungsverluste (z. B. im Kraftwerk oder in der Gasaufbereitung) sowie Herstellungsaufwände für die Infrastruktur berücksichtigt werden. Allerdings entste-

hen diese Belastungen nicht am Standort der Verpackungsnutzung selbst, sondern in vorgelagerten Energiesystemen. Damit sind sie – ähnlich wie beim Wasser – nur eingeschränkt geeignet, um standortbezogene Fragestellungen oder Prozessoptimierungen zu bewerten. Eine Fokussierung auf Primärenergiebedarfe oder auf den direkten Handlungsanreiz zur Reduktion des Energieeinsatzes im Betrieb verwässern: Für den Anwender ist der entscheidende Einflussfaktor der unmittelbar bezogene Strom- oder Gasverbrauch, da dieser sowohl ökonomisch (Kosten) als auch ökologisch (direkte Emissionen und Ressourcenbeanspruchung) unmittelbar relevant ist.

Ein weiterer Punkt betrifft die **Zusammenführung von Strom- und Gasbedarf** zu einer gemeinsamen Endenergiemenge. Zwar unterscheiden sich die Energieträger in ihrer Bereitstellung und Nutzung, doch ist der Gaseinsatz zumindest bei den Waschprozessen und dem Kunststoffrecycling eher gering und fällt gegenüber dem Strombedarf weniger ins Gewicht. Gleichzeitig schreitet die Elektrifizierung von Produktions- und Reinigungsprozessen weiter voran, sodass zukünftig ein noch größerer Anteil der Energie in Form von Strom bereitgestellt wird. Die Fußabdrücke von Strom und Gas nähern sich zudem in Deutschland aneinander an (Strom (2024): 350 g CO₂e/kWh, Gas (2024): Gewinnung: 72 g CO₂e/kWh, Verbrennung 201 gCO₂e/kWh⁵). In einigen europäischen Ländern ist der Fußabdruck von Strom bereits deutlich geringer als der von Gas (z. B. Norwegen, Schweden, Frankreich). Der Energiebedarf bei Verdampfungs- und Trocknungsprozessen lässt sich durch Energierückgewinnung durch Wärmepumpen oder Brüdenverdichter drastisch reduzieren. Die Zusammenfassung beider Energieträger zu einem Endenergiebedarf erleichtert damit die Vergleichbarkeit und fokussiert die Analyse auf die wesentliche Größe. **Aus diesen Gründen wird in dieser Studie die Endenergieaufnahme eines Prozesses für dessen Bewertung herangezogen.**

1.4 Limitationen der Betrachtung

Der vorliegende Bericht soll dazu beitragen, eine **sachgerechte Diskussion** zu ermöglichen, indem er die Betrachtung der wichtigsten Prozessschritte zur Kreislaufschließung in Bezug auf ihre Wasser- und Energieverbräuche sowie die erreichbare Zirkularität detailliert untersucht. Spezifika, Vor- und Nachteile dieser Prozesse werden so deutlich gemacht. Gleichwohl stellt der Bericht **keine vergleichende Ökobilanz** dar und eignet sich daher weder dazu, generelle Aussagen zur Vorteilhaftigkeit von Einweg- oder Mehrwegsystemen zu treffen noch die ökologisch beste Lösung auf der Ebene einer speziellen Verpackungsaufgabe zu finden. Für solche Zwecke sind vollständige Ökobilanzen, die weitere Schritte des Lebenszyklus, bspw. Herstellungs- und Transportaufwände oder den spezifischen Materialeinsatz abbilden und auf eine geeignete funktionelle Einheit beziehen, erforderlich.

1.5 Verwendete Demonstratoren

Vom Auftraggeber, der Stiftung Initiative Mehrweg unterstützt von europäischen Vertretern der Mehrweglieferketten, wurden in Abstimmung mit dem

⁵ <https://www.umweltbundesamt.de/themen/co2-emissionen-pro-kilowattstunde-strom-2024>
<https://projektraeger.dlr.de/sites/default/files/2024-01/documents/WPKS-Studie-CO2Bilanz.pdf>

Auftragnehmer zwei Demonstratoren ausgewählt, anhand derer die Analysen durchgeführt wurden. Dies sind:⁶

- To-go-Becher (kurz »**Becher**«)
- Steigen, Kartons für Obst, Gemüse, Backwaren, Fleisch, Fisch etc. (kurz »**Boxen**«)

1.5.1 To-go-Becher

Der To-go-Becher (Bild 5) steht in dieser Studie stellvertretend für eine Vielzahl von Verpackungen, die das Mitnehmen oder das Unterwegs-Verzehren von fertigen Getränken und Speisen (**Take-Away-Food**) ermöglichen. Die entsprechenden Verpackungssysteme spielen für Großveranstaltungen (Events), Fast-Food-Restaurants, Bäckereien und Unternehmen aus der Systemgastronomie mit einem Tresenverkauf (Counter-Service), für Online- und Abholservices sowie Drive-Ins eine zentrale Rolle. Viele Geschäftsmodelle wären ohne sie nicht vorstellbar.

Die Gesellschaft für Verpackungsmarktforschung ermittelte für den Bereich »Einweggeschirr und Verpackungen für den Sofortverzehr« für das Jahr 2017 eine **jährliche Verbrauchsmenge von 281 186 Tonnen** (Gesellschaft für Verpackungsmarktforschung mbH (GVM) 2018). Dies entspricht ca. 3,4 kg pro Person und Jahr. Seit 1994 steigt diese Menge im Durchschnitt pro Jahr um 2,5 %. Der Kunststoffanteil an Einweggeschirr und Verpackungen für den Sofortverzehr beträgt ca. 27,6 % und ist seit 1994 mit 3,9 % pro Jahr überdurchschnittlich gestiegen.



Bild 5: Beispielfotografie von Bechern und ihre Materialien als Demonstratoren für diese Studie

Einwegbecher

Vor allem in Fast-Food-Restaurants, Bäckereien, Systemgastronomien mit Tresenverkauf, Online-Bestellungen und Drive-Ins, aber auch in Unternehmen haben sie sich etabliert: Rund 17 % der Deutschen konsumieren mehrmals pro

⁶ Die fett gesetzten Begriffe werden im Folgenden auch als Kurzformen verwendet.

Woche oder täglich Coffee to go. Ihr Füllvolumen reicht typischerweise von 80 bis 600 ml. Oft bestehen Becher, Deckel und ggf. Manschette aus separaten Komponenten. Dominierende Materialien sind **Kartonbecher mit Polyethylen-(PE)- oder Polylactid-(PLA)-Beschichtung**. Bei den Kunststoffbechern dominiert **Polystyrol (PS)**. Es gibt zudem Becher aus expandiertem PS (EPS), Polypropylen (PP), Polyethylen (PET) oder Polymilchsäure (PLA). Die Masse variiert je nach Größe und Ausführung (ein- oder doppelwandig) zwischen ca. **4,1 und 18,2 g pro Becher**; der Kunststoffanteil am Kartonbecher liegt bei 4–7 %. Der Einwegdeckel ist zumeist aus PS und wiegt etwa 3,2 g (Kauertz et al. 2019).

Für Deutschland wird der Verbrauch von Einweg-Getränkebechern für Heißgetränke auf rund **2,8 Milliarden Stück pro Jahr** geschätzt (BMUKN 2025). Davon entfallen ca. 1,66 Milliarden auf Kartonbecher und 1,14 Milliarden auf Kunststoffbecher. Im To-go-Bereich werden davon 1,1 bis 1,2 Milliarden Becher eingesetzt. Daraus ergibt sich ein Gesamtmengestrom von **28 000 Tonnen pro Jahr**, 70 % davon aus Karton. (Kauertz et al. 2019). Für Kaltgetränke, die vor allem bei Events in Bechern ausgegeben werden, liegen keine Daten vor.

Eine ordnungsgemäße Entsorgung von Einwegbechern würde über die **dualen Systeme (gelber Sack/gelbe Tonne)** stattfinden. Häufig werden sie aber fälschlicherweise der Altpapiersammlung zugeführt, wobei viele Altpapiersortieranlagen sie aussortieren und der Verbrennung zuführen (Grummt und Fabian 2023).

Mehrwegbecher

Mehrwegbecher für To-go-Anwendungen sind wiederverwendbare Trinkgefäße, die entweder privat mitgebracht (BYO-System), als anbieterspezifischer Becher (oft mit Logo) oder in überregionalen Poolssystemen bereitgestellt werden. Sie werden nach Nutzung zurückgegeben, gereinigt und erneut eingesetzt.

2015 hat die deutsche Umwelthilfe das Projekt »Sei eine Becherheldin!« gestartet (Deutsche Umwelthilfe e.V. 2015). Ab 2016 etablierten sich erste Poolssysteme in Deutschland. Zunächst entstanden viele lokale oder kommunale Lösungen (z. B. in Düsseldorf, Freiburg, Mannheim, Kreis Höxter) (Pachaly 2021). Parallel dazu formierten sich überregionale Systeme wie RECUP (> 20 000 Ausgabestellen), FAIR CUP (> 30 000) und VYTAL (> 6000). Die ersten beiden Systeme nutzen ein Pfandsystem (1 €); Vytal arbeitet digital ohne Pfand. Weitere Modelle (z. B. ÖkoCup) setzen auf Kaufbecher oder niedrigere Pfandhöhen um 0,50 €. Rücknahmeautomaten und Leitlinien (Lebensmittelverband Deutschland 2020) unterstützen den hygienischen Rücklauf. Mehrwegbecher decken die **gleichen Einsatzfelder wie Einwegbecher** ab: Take-away in Gastronomie, Bäckereien, Cafés, Lieferdiensten oder Kantinen. Ziel ist, Einwegbecher direkt zu substituieren und eine bequeme Nutzung durch eine Vielzahl von Rückgabepunkten zu ermöglichen. Aktuell dominiert bei Mehrwegbechern **Polypropylen (PP)**. Teilweise werden Polylactid (PLA) oder Styrol-Acrylnitril-Copolymere genutzt; Deckel und Verschlüsse können aus TPE oder PP bestehen. Frühe kommunale Systeme nutzten manchmal noch Polystyrol-Lösungen.

Unter der Annahme, dass Einwegsysteme ausschließlich einmal verwendet werden und bislang ca. 15 Millionen Mehrwegbecher ausgegeben wurden, die durchschnittlich jährlich 6 Nutzungen erreichen (Pachaly 2021), lässt sich für die Mehrwegsysteme aktuell ein **Nutzungsanteil von ca. 3,1 % abschätzen** (Tabelle 1). Die Mehrwegsysteme verzeichnen derzeit sowohl in Bezug auf die Zahl der Ausgabestellen, der ausgegebenen Becher als auch der Nutzungen deutliche Zuwachsraten. Daher kann erwartet werden, dass sich der Anteil an den Nutzungen in den nächsten Jahren weiter erhöhen wird.

Tabelle 1: Vergleich der Verbreitung der Systeme (Kauertz et al. 2019)

System	Material	Nutzungen	Anteil an den Nutzungen
Einwegbecher	PS	1 140 000 000	39,4 %
	PPK+PE	1 660 000 000	57,4 %
Mehrwegbecher	Kunststoff	90 000 000	3,1 %

Mehrwegbecher werden nach Rückgabe gereinigt und erneut in den Umlauf gebracht (Re-Use). Erst bei Beschädigung oder Funktionsverlust erfolgt das Recycling – in der Regel werkstofflich, sofern sortenreine Kunststoffe (z. B. PP) eingesetzt werden. Pfand- bzw. digitale Rückgabesysteme, Rücknahmeautomaten und klare Hygienevorgaben sichern hohe Rücklaufquoten und einen geschlossenen Kreislauf.

1.5.2 Boxen (Kisten, Kartons, Steigen)

Für die Lieferkette von insbesondere **loser, aber auch abgepackter Frischware** aus den Lebensmittelsegmenten Obst und Gemüse, Fleisch, Fisch sowie Backwaren kommen flache Boxen (Kisten, Kartons, Steigen) zum Einsatz. Diese bestehen traditionell aus Holz, Pappe sowie seit Anfang der 1990er Jahre auch Kunststoff. Die Boxen sind in Normen den Kleinladungsträgern (KLT) zugeordnet. Die Kisten werden beim Produzenten befüllt, in der Regel auf Paletten gestapelt, bei Bedarf für den Transport separat gesichert (z. B. mit Kantenschutz, Wickelfolie oder Transportbändern) und über die verschiedenen Handelsstufen zum Einzelhandel transportiert. Zudem erfolgt bei Bedarf die Behandlung des Füllguts in Reifereien, bevor die Ware in den Einzelhandel ausgeliefert wird.

Einweg-Boxen aus PPK

Einweg-Boxen aus Papier, Pappe, Karton (PPK) werden nach Befüllung und Transport von Ernte- bzw. Packstelle über Verteilzentren bis zum Einzelhandel einmalig genutzt und anschließend entsorgt oder dem Altpapierrecycling zugeführt. Zunächst wurde für Einwegboxen vor allem Holz als Werkstoff genutzt. Zunehmend setzten sich aber Kartons aus PPK im Obst- und Gemüsebereich durch, dominieren inzwischen seit Jahrzehnten und wurden mit zunehmender Logistikstandardisierung weiter professionalisiert. Üblich sind heute Kartonagen aus **Standardvollpappe oder Wellpappe**. Da die meisten Aufgaben im B2B-Bereich eine hohe mechanische Belastung darstellen, ist hier **hochwertiger Karton aus Kraftliner und Halbzellenstoff** etabliert. Häufig sind die Kartons bedruckt. Beschichtungen sind in dieser Anwendung nicht die Regel, aber aus

Hygienegesichtspunkten zunehmend gefordert. Die Materialvielfalt ist gering, dennoch bestehen große Variationen bei Abmessungen und Füllvolumina.

Nach Nutzung gelangen gewerblich genutzte Kartonagen überwiegend in den gewerblichen Altpapierstrom; die **stoffliche Rücklaufquote** liegt für Kartonsteigen bei **ca. 88 %**, weil Restverluste und energetische Verwertung verbleiben (FEFCO 2024). Diese Quote ist allerdings kaum noch steigerbar, da die maximale Umlaufzahl für Papierfasern durch Qualitätsverluste begrenzt ist und ständig Frischfasern zugeführt werden müssen.^{7,8}

Mehrweg-Boxen aus Kunststoff

Mehrweg-Boxen (Steigen) aus Kunststoff sind stapelbare, teils klappbare Kleinladungsträger für Obst, Gemüse, Fleisch oder Backwaren. Sie werden nach Rückgabe gereinigt, geprüft und erneut eingesetzt und sind in standardisierten Pool-Systemen organisiert. Seit Anfang der 1990er Jahre kamen Kunststoff-Mehrwegsteigen in großen Stückzahlen auf den Markt (Euro Pool System 2021). Nach der Standardisierung folgten zusätzliche Größen, klappbare Varianten (Volumenreduzierung 67–87 %) und die Integration von Codes (Barcodes, GRAI, RFID) für automatisiertes Tracking. Heute dominiert ein **Mietmodell**, bei dem Anwender entweder pro Tag oder pro Umlauf eine Miete entrichten und die Kisten nach Nutzung zurückgeben. Einsatzschwerpunkt ist bislang vor allem die B2B-Logistikkette für frische Lebensmittel (Obst/Gemüse, Fleisch, Backwaren). Die Kisten werden beim Produzenten befüllt, auf Paletten gestapelt, gesichert und durch die Handelsstufen bis zum Einzelhandel transportiert; vor Auslieferung an den Markt erfolgt ggf. eine Reifebehandlung.

Für die Kisten werden vor allem PP und HDPE als Monomaterialien genutzt, die Kisten sind damit sehr gut mechanisch recycelbar. Die Gewichte liegen – je nach Größe – zwischen rund 550 und 2070 g; Füllvolumina reichen bei den im O/G-Segment üblichen Steigen von ca. 9,25 bis 47,14 L. Es existieren auch sogenannte Big Boxes mit Füllvolumina bis zu einem Kubikmeter oder mehr.



Bild 6: Verschiedene Boxen und ihre Materialien als Demonstratoren in diese Studie

⁷ <https://www.umweltbundesamt.de/papier-pappe-kartonage-ppk-0#hinweise-zum-recycling> (abgerufen am 16.9.2025)

⁸ <https://www.holbox.de/uber-uns/nachrichten/maerchen-nur-recyclates-papier-ist-nachhaltig> (abgerufen am 16.9.2025)

Der Bestand und Umlauf ist stark gewachsen: 2006 waren etwa 200 Mio. Mehrwegsteigen in **Europa** im Umlauf, **2017 bereits rund 600 Mio.** (Behrens et al. 2018). Allein die beiden größten Poolbetreiber auf dem europäischen Markt erreichen in Summe etwa 2,5 Mrd. Nutzungen pro Jahr (Bertling et al. 2022). In der Literatur werden pro Kiste Umlaufzahlen zwischen 30 und 150 sowie Nutzungsdauern von 5 bis 15 Jahren angenommen, wobei nach eigenen Recherchen eine **Umlaufzahl von mindestens 100** bei einer ungefähren **Rotationszahl von 8 pro Jahr** realistisch ist (Bertling et al. 2022).

Leere Steigen werden im Handel gesammelt, zu Wasch- und Hygienezentren transportiert, gereinigt und getrocknet, wenn nötig desinfiziert und qualitätsgeprüft, anschließend erneut verteilt. Defekte Steigen werden repariert oder ausgesondert und in der Regel werkstofflich recycelt. **Rücklaufquoten über 99 %** sind üblich.

2 Gesetzliche Anforderungen und Normen zur Herstellung, Nutzung und Reinigung für Verpackungen mit Lebensmittelkontakt

Für Verpackungen mit Lebensmittelkontakt gelten **hohe Anforderungen**.⁹ Dies betrifft sowohl Einwegverpackungen – insbesondere, wenn diese aus Rezyklaten hergestellt werden – als auch Mehrwegverpackungen vor der erneuten Nutzung, wobei bei deren Reinigung, Befüllung und Übergabe an den Kunden verschiedene Hygienevorschriften eingehalten werden müssen. Bei den hier betrachteten Demonstratoren handelt es sich um Lebensmittelverpackungen aus Kunststoff, Papier, Pappe, Karton (PPK) oder Holz. Im Folgenden werden daher die geltenden Bestimmungen und Normen für Einweg- und Mehrwegverpackungen aus den betreffenden Materialien zusammengefasst und bewertet. Bild 8 am Ende des Kapitels stellt die untersuchten Instrumente in einer Gesamtübersicht dar.

Es existieren **unterschiedliche Regulierungsarten**, von Verordnungen der Europäischen Union (EU) über EU-Rahmenrichtlinien, welche in nationales Gesetz umgesetzt werden, über DIN-Normen, Branchenrichtlinien bis hin zu Empfehlungen, bspw. des Bundesinstituts für Risikobewertung (BfR). Diese Regularien **unterscheiden sich sehr stark hinsichtlich ihrer Verbindlichkeit und Kontrollfunktion** für die betreffenden Unternehmen. Während Gesetze und Verordnungen einen direkten Zwang für das Unternehmen darstellen, ist eine Selbstverpflichtung oder Stellungnahme deutlich unverbindlicher. Zum Beispiel kann ein Nichtbeachten einer Stellungnahme des BfR über den Einsatz von Altpapier als Rohstoff für Lebensmittelverpackungen dem Unternehmen zwar als Fahrlässigkeit ausgelegt werden, falls ein Schaden entsteht, prinzipiell sind solche Texte aber nicht rechtsverbindlich. Auch Normen sind in der Praxis oft faktisch verpflichtend, rechtlich aber freiwillig. Diese Einordnung ist bei der Bewertung der Regulierung der einzelnen Verpackungstypen wichtig.

Unabhängig vom Material und Verpackungstyp (Einweg oder Mehrweg) gelten EU-weit für alle Materialien mit Lebensmittelkontakt – und somit auch für Lebensmittelverpackungen – die **Rahmenverordnung EU 1935/2004** (Europäisches Parlament; Europäische Kommission 2004) und die Kommissionsverordnung zur **guten Herstellungspraxis EU 2023/2006** (»GMP-Verordnung«) (Europäische Kommission 2006). Die GMP-Verordnung 2023/2006 stellt Anforderungen an den Herstellungs- und Reinigungsprozess, um dies auch sicherzustellen, zum Beispiel indem sie ein Qualitätssicherungssystem und eine umfassende Dokumentation der Qualitätskontrollen vorschreibt.

Materialien, die für den Kontakt geeignet sind, tragen dann das in Bild 7 dargestellte Symbol. Die Rahmenverordnung 1935/2004 legt grundsätzlich fest, dass Lebensmittelverpackungen unter kontrollierten Bedingungen hergestellt werden müssen, dass sie in ihren Eigenschaften gesundheitlich unbedenklich sein müssen und die Zusammensetzung, den Geruch oder die Farbe des Lebensmittels nicht beeinträchtigen dürfen und dass alle Materialien und Vorprodukte für

⁹ Eine Übersicht von Gesetzen, Verordnungen, Leitlinien und Handreichungen zum Thema Materialien mit Lebensmittelkontakt bietet das BVL (Bundesamt für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit (BVL) 2025). Dort gelistete Dokumente bezüglich Materialien wie Keramik oder Zellglasfolien oder aktiver Materialien sowie Spezifika zur Einfuhr bestimmter Stoffe werden in diesem Bericht berücksichtigt.

diese Verpackungen in der Lieferkette nachverfolgbar sein müssen. Nach Artikel 5 der **Verordnung EU 1935/2004** behält es sich die Europäische Kommission vor, für bestimmte Materialien zusätzliche »**Einzelmaßnahmen**« (also weitere Verordnungen) zu erlassen, z.B. für Kunststoffe, PPK, Druckfarben, Metalle etc. (Europäisches Parlament; Europäische Kommission 2004).



Bild 7: Symbol in der europäischen Union zur Kennzeichnung von Materialien, die dazu bestimmt sind, mit Lebensmitteln in Berührung zu kommen (nach der Verordnung (EG) Nr. 1935/2004)

Zentral für Verpackungen allgemein ist auch die neue **EU-Verordnung 2025/40** über Verpackungen und Verpackungsabfälle (Packaging and Packaging Waste Regulation »**PPWR**«), die unter anderem Vorgaben zu Stoffbeschränkungen, Recyclingfähigkeit, Rezyklateinsatzquoten und den Einsatz von wiederverwendbaren Verpackungen macht (Europäisches Parlament 2025). Die PPWR betrifft zwar Verpackungen aus jeglichem Materialtyp, legt aber einen klaren Fokus auf Kunststoffverpackungen¹⁰, was beispielsweise von der Deutschen Umwelthilfe als problematisch eingestuft wird (Fischer 02.05.2025), da dies Kunststoff in unverhältnismäßiger Weise benachteiligt. Bezüglich Beschränkungen »besorgniserregender Stoffe« will die Kommission bis Ende 2026 einen Bericht vorlegen, der diese Stoffe auflistet und bewertet. Spezifiziert werden in der PPWR bisher nur verschärfte Grenzwerte für Konzentrationen von per- und polyfluorierten Alkylsubstanzen (PFAS), die auf insgesamt 250 ppb festgelegt wurden (Europäisches Parlament 2025).

Indirekt relevant für Verpackungen ist zudem die **Verordnung EU 852/2004 zur Lebensmittelhygiene** (Europäisches Parlament 2004), die den hygienischen und sicheren Umgang mit Lebensmitteln durch den Lebensmittelunternehmer vorschreibt. Diese Verordnung adressiert zwar nicht die Hersteller von Verpackungen, beinhaltet aber, wie Lebensmittel verpackt und gelagert werden müssen (nämlich so, dass eine Kontamination ausgeschlossen ist). Die dazugehörige **DIN 10516** legt fest, in welchem Umfang und wie der Lebensmittelunternehmer Geräte, Räume und auch Verpackungen reinigen bzw. desinfizieren muss und wie dies zu prüfen ist, um der Verordnung 852/2004 zu entsprechen (DIN 10516).

2.1 Verpackungen aus Kunststoff

Neben den oben genannten zentralen Verordnungen EU 1935/2004 (Europäisches Parlament; Europäische Kommission 2004) und EU 2023/2006 (Europäische Kommission 2006) hat die Kommission für Verpackungen aus Kunststoff

¹⁰ Allein quantitativ wird der Begriff »Kunststoff« in der Verordnung 264-mal genannt, »Papier«, bzw. »Pappe« oder »Karton« lediglich 30-mal und »Glas« oder »Holz« deutlich seltener (Europäisches Parlament 2025).

von der in EU 1935/2004 angelegten Option einer »Einzelmaßnahme« Gebrauch gemacht und speziell für Kunststoffe zusätzlich die **Kommissionsverordnung EU 10/2011** (Europäische Kommission 2011) erlassen. Für andere hier behandelte Materialien wie PPK oder Holz gibt es solche Verordnungen (bislang) nicht. Zentrales Element der EU 10/2011 ist eine Positivliste, auf der Ausgangsstoffe, Additive und Hilfsmittel aufgeführt sind, welche für den Lebensmittelkontakt zugelassen sind. Die Liste wird anlassbezogen angepasst, bspw. wenn Unternehmen bei der Europäischen Behörde für Lebensmittelsicherheit (EFSA) erfolgreiche Anträge für die Zulassung weiterer Stoffe stellen. Innerhalb dieser Positivliste sind für einen Teil der Stoffe auch Migrationsgrenzwerte festgelegt. Produzierende Unternehmen müssen diese Grenzwerte nachweisen, bspw. durch Labortests.

Um die Konformität mit EU 1935/2004 und EU 10/2011 korrekt nachzuweisen, wurden Industriestandards entwickelt, wie die Gesamtmigration (**gemäß DIN EN 1186**) und die spezifische Migration bestimmter Stoffe (**DIN EN 13130**) aus Kunststoffverpackungen in Lebensmittel zu messen ist und wie sich das Material beim Erhitzen in Mikrowelle oder Ofen verhalten muss (**DIN EN 14233**).

Darüber hinaus gilt spezifisch für rezyklierte Kunststoffverpackungen zusätzlich die **Verordnung EU 2022/1616** (Europäische Kommission 2022), jüngst ergänzt durch die **Änderungsverordnung EU 2025/351**. Darin wird das zulässige Ausgangsmaterial für ein Recycling, also die Sammlung und Vorbehandlung spezifiziert: Kunststoffe müssen aus Siedlungsabfällen stammen, entweder getrennt oder gemeinsam mit anderen Verpackungsabfällen, aber zwingend separat vom Restabfall gesammelt werden und aus Gegenständen stammen, und mindestens zu 95 % aus Lebensmittelverpackungen stammen. Das heißt in der Praxis, dass Lebensmittelverpackungen aus Kunststoff, die über das duale System gesammelt wurden, grundsätzlich für den Wiedereinsatz im Lebensmittelbereich geeignet sind. Das im gelben Sack oder der gelben Tonne gesammelte Material muss dann dekontaminiert (Artikel 7) und nachbehandelt (Artikel 8) werden.

Die große Einschränkung für den Einsatz von Rezyklaten besteht darin, dass im Annex I dieser Verordnung lediglich zwei **»geeignete« Recyclingtechnologien** aufgeführt sind, welche allgemein zugelassen sind, um Rezyklate für Lebensmittelanwendungen aus Abfällen zu gewinnen. Diese sind

- das mechanische Recycling von Post-Consumer Polyethylenterephthalat (PET)-Abfällen, bei denen mindestens 95 % aus Lebensmittelanwendungen stammen, und
- das Recycling von Kunststoffen aus der Positivliste der 10/2011, die aus geschlossenen und überwachten Produktkreisläufen, also aus Produktionsabfällen (PIR), stammen.

Für alle weiteren **neuartigen Technologien** (Verfahren und Kunststoffarten) müssen die Betreiber einen Antrag auf eine positive Stellungnahme stellen. Sie können dies gemäß Artikel 14 EU 2022/1616 tun, sobald mindestens vier aufeinanderfolgende Qualitätsberichte über ihre Technologie vorliegen, d. h. frühestens nach zwei Jahren Betriebszeit (Europäische Kommission 2022). In der Zwischenzeit dürfen sie zwar Rezyklate herstellen, zu Verpackungen verarbeiten

und auch am Markt anbieten, tun dies aber zunächst ohne explizite Genehmigung (»positive opinion«) der EFSA und somit auf eigenes Risiko, was zu einer allgemeinen Zurückhaltung bei der Ausweitung von Recyclingverfahren auf andere Stoffgruppen als PET führt (Eisenträger 25.02.2025). Der gesamte Prozess von der Inbetriebnahme bis zur Stellungnahme der EFSA kann bis zu 7 Jahre dauern (GKV 2022). In ihrer Stellungnahme kann die EFSA dann ihre Anforderungen an das neue Recyclingverfahren gemäß ihrer Einschätzung festlegen. Bspw. könnte sie für Nicht-PET Materialien auch höhere Mindestanteile als die dort geltenden 95 % aus Lebensmittelanwendungen festsetzen, an der sich aber viele der Unternehmen bei der Entwicklung ihrer Verfahren orientieren (Eisenträger 25.02.2025). Aktuell sind über 40 solcher »neuartigen Technologien« in der Entwicklung (Eisenträger 25.02.2025). Das in Artikel 24 EU 2022/1616 geplante, öffentlich einsehbares Register aller neuartigen Technologien wurde bisher nicht umgesetzt (Europäische Kommission 2025a), so dass hier keine Transparenz herrscht.¹¹

Durch die **Änderungsverordnung 2025/351** ändert sich das Zulassungsverfahren grundsätzlich nicht, die Zulassung von Recyclingtechnologien für Lebensmittelanwendungen ist aber tendenziell schwerer geworden, da die Nachweispflichten, bspw. was die Reinheit des Materials angeht, verschärft wurden (Europäische Kommission 2025b).

Aufgrund der Komplexität der Regulierung haben die betreffenden Verbände (**GKV, BDE, bvse**) **gemeinsame Leitlinien** veröffentlicht, welche Definitionen, Entscheidungsbäume und Praxisbeispiele enthalten, die die Umsetzung der Vorgaben durch die Industrie erleichtern sollen (GKV 2022). In der Praxis haben die genannten Bestimmungen zur Folge, dass es sich bisher bei Kunststoffverpackungen aus Post-Consumer-Rezyklat (PCR) nahezu ausschließlich um PET handelt.¹²

Die hohen Anforderungen an Hygiene und Lebensmittelsicherheit stehen in einem gewissen Spannungsfeld zu den Anforderungen, die an Kunststoffverpackungen hinsichtlich Umweltauswirkungen und Kreislaufwirtschaft gestellt werden. **Die EU-Verordnung 2025/40 (»PPWR«)** sieht für Kunststoffverpackungen sowohl eine **Recyclingquote** (50 %) als auch differenzierte **Rezyklateinsatzquoten** vor (Europäisches Parlament 2025). Für Lebensmittelverpackungen aus allen Kunststoffen außer PET gelten nach Artikel 7 Absatz 1b und 2b ab 2030 ein Mindestanteil von 10 % und ab 2040 ein Mindestanteil von 25 % PCR, was theoretisch ein starkes Signal an die Industrie ist. Ob es zu einer wesentlichen Verbesserung hinsichtlich der Kreislaufführung kommen wird, ist allerdings fraglich, da unter Absatz 5 Lebensmittelverpackungen davon ausgenommen sind, wenn »die Menge des Rezyklatanteils [...] dazu führt, dass gegen die Verordnung Nr. 1935/2004 verstoßen« wird. (Europäisches Parlament 2025). In der Praxis heißt das also, dass Rezyklate nur eingesetzt werden müssen, wenn sie die nötigen Grenzwerte einhalten und nicht, dass erreicht werden muss, dass sie dies tun. In Anhang V PPWR werden verschiedene **Arten von Kunststoffeinwegverpackungen verboten**, unter anderem Netze, Beu-

¹¹ Das Register soll künftig auf dem Informationsportal der Europäischen Kommission zu Lebensmittelkontaktmaterialien einsehbar sein, unter: [Food and Feed Information Portal Database | FIP](#).

¹² Seit Januar 2025 sind erstmals Joghurtbecher aus PS im Handel, welche mittels mechanischem Recycling aus PCR hergestellt wurden (Wacker 2024a).

tel und Schalen für Obst und Gemüse unter 1,5 kg oder Verpackungen für Lebensmittel, die im Gastgewerbe verzehrt werden, sowie Verpackungen für Einzelportionen (Europäisches Parlament 2025).

2.2 Verpackungen aus PPK

Die EU-Rahmenverordnung 1935/2004 ermöglicht es dem Gesetzgeber, auch für weitere Materialien spezifische Verordnungen zu erlassen – darunter auch PPK und Holz, die in dieser Studie mitbetrachtet werden. Solche delegierten Rechtsakte existieren für diese Materialien allerdings bisher nicht, und die papierverarbeitende Industrie geht davon aus, dass dies in absehbarer Zukunft so bleiben wird (European Directorate for the Quality of Medicines & HealthCare (EDQM) 2021). In der Konsequenz gibt es eine Reihe von Selbstverpflichtungen der Branche, bestehend aus den »**CEPI Responsible Sourcing Guidelines**« (CEPI 2016) sowie der »**CEPI Branchenrichtlinie zur Herstellung und Verarbeitung von PPK mit Lebensmittelkontakt**« (CEPI 2019).

Empfehlungen an PPK mit Lebensmittelkontakt bezüglich verwendeter Papierrohstoffe, Fabrikationshilfen und Papierveredelungsstoffen werden außerdem vom **BfR** in der **Empfehlung XXXVI** festgesetzt (Bundesinstitut für Risikobewertung 2023). Darin steht, dass wiedergewonnene Fasern aus PPK grundsätzlich verwendet werden dürfen, sofern diese den generellen Anforderungen aus der Verordnung 1935/2004 (Europäisches Parlament; Europäische Kommission 2004) entsprechen, die in der Empfehlung festgelegten Grenzwerte nicht überschreiten und die Altpapierqualitäten »sorgfältig ausgewählt« wurden. Konkret wird genannt, dass Altpapier der Sorte 5.01 (gemischtes Altpapier) nach DIN EN 643 (DIN EN 643) sowie PPK aus der Gesamtmüll-Sortierung und oder anderen Mehrkomponenten-Sammlungen¹³ für den Kontakt mit Lebensmitteln ungeeignet sind (Bundesinstitut für Risikobewertung 2023). Welche Altpapiersorten nach der Sortierung im Lebensmittelkontakt verwendet werden dürfen oder sollten, wird nicht explizit ausgeführt. In den CEPI-Richtlinien steht lediglich, dass solche Sorten ausgeschlossen werden sollten, die »eindeutig für den Kontakt mit Lebensmitteln ungeeignet sind«¹⁴, ohne aber zu spezifizieren, um welche es sich handelt.

2.3 Spezifische Hygieneanforderungen an Mehrwegverpackungen

Für die Herstellung von Mehrwegverpackungen aus Kunststoff gelten grundsätzlich alle Anforderungen hinsichtlich ihrer Sicherheit, Herstellung und der Beschaffenheit ihrer Ausgangsmaterialien, die in den obigen Unterkapiteln auch dargelegt wurden (insbesondere EU 1935/2004, EU 2023/2006 und 10/2011, zusätzlich im Falle von Rezyklateinsatz EU 2022/1616). Für die Nutzungsphase hat der Arbeitskreis Gewerbliches Spülen eine Übersicht zusammengetragen (Arbeitskreis Gewerbliches Spülen 2025).

In der **EU-Verordnung EU 852/2004 über Lebensmittelhygiene** ist festgeschrieben, dass Container, Transportkisten etc. nach der Anwendung gereinigt und nötigenfalls desinfiziert werden müssen. In Anhang II, Kapitel X der Verordnung steht zur Beschaffenheit der Verpackungen zudem, dass diese leicht

¹³ D. h. allen Fraktionen außer der blauen Tonne.

¹⁴ Originalzitat: »In addition, reference should be made to EN 643 [Kategorisierung der Altpapiersorten], to exclude those grades that are clearly unsuitable for the manufacturing of food contact paper and board.«

zu reinigen und nötigenfalls desinfizierbar konstruiert sein müssen (Europäisches Parlament 2004). Anforderungen für Einwegverpackungen werden in dieser Verordnung keine festgelegt.

Für die Reinigung ist zusätzlich insbesondere die **DIN EN 17735** zu **gewerblichen Spülmaschinen** relevant, sofern die Verpackungen zentral oder dezentral an der Ausgabestelle gereinigt werden. Darin sind die Hygieneanforderungen für gewerbliche Spülmaschinen einschließlich der Wasserqualität, der Temperatur, der Kontaktzeit und der eingesetzten Behandlungsmittel normiert. Als Richtwert gilt eine Kontaktzeit von 90–120 Sekunden bei einer Temperatur von 80–85 °C in der Klarspülzone¹⁵ (DIN EN 17735). Diese hohen Temperaturen bringen einen hohen Energiebedarf mit sich und sie beschränken für dünnwandige Produkte aus Materialien mit geringer Hitzebeständigkeit den Einsatz (Hesseler 07.01.2025).

Spezifisch für **Mehrwegkisten und -boxen** wurde eine zusätzliche Norm erarbeitet, die **DIN 10522**, die je nach Inhalt drei Kategorien unterscheidet: wenig kritische (z. B. Obst und Gemüse), kritische (z. B. Brot) und sehr kritische Behälter (z. B. Fleisch) (DIN 10522). Je nach Kategorie unterscheidet die Norm das nötige Spülergebnis: Wenig kritische Kisten müssen nur optisch sauber sein, kritische Kisten müssen zusätzlich eine keimarme Oberfläche aufweisen (aerobe mesophile Keimzahl, Hefen, Schimmelpilze), bei sehr kritischen Kisten sollten zusätzlich weitere Typen von Mikroorganismen geprüft werden und ein bestimmter Trockenheitsgrad erreicht werden. Zu den Verfahrensparametern (Temperatur, Kontaktzeit, Konzentration und Art des Reinigers etc.) werden keine spezifischen Richtwerte gegeben, auch nicht in Bezug auf die oben genannten Kategorien. Stattdessen heißt es, dass diese Parameter stark von der Art und dem Ausmaß der Verschmutzung abhängen und daran ausgelegt werden müssen, teilweise genüge z. B. auch kaltes Wasser. Sofern eine thermische Desinfektion vorgesehen ist, müssten allerdings 60 °C im Reinigungstank bzw. 80 °C im Klarspültank erreicht werden (DIN 10522).

Kontrollen werden durch die örtlichen Veterinärämter durchgeführt und unterscheiden sich gemäß Betreiberaussagen bezüglich der geforderten Art und des Umfangs, in der die Hygienevorschriften umgesetzt werden sollen (Hesseler 07.01.2025). Das Spülergebnis in Spülzentren wird in der Regel täglich mittels mikrobiellen Abklatschtests geprüft und laut **DIN EN 17735**¹⁶ mindestens halbjährlich in einem externen Labor geprüft. Zuständig für die Kontrolle der allgemeinen Hygienebedingungen ist die kommunale Lebensmittelüberwachung (Bertling et al. 30.01.2025).

In vielen Mehrwegapplikationen kommt es vor, dass Kunden selbstgereinigte Behältnisse zu einer Ausgabestelle (Betriebsstätten der Gastronomie, Systemgastronomie, Gemeinschaftsverpflegung oder dem Einzelhandel) mitbringen, um diese entweder selbst zu befüllen oder befüllen zu lassen. Dies ist grundsätzlich rechtlich möglich, jedoch müssen auch hierbei Hygieneregeln beachtet werden. Der Lebensmittelverband Deutschland e. V. hat hierzu **zwei Leitlinien für betreffende Unternehmen veröffentlicht** – eine spezifische für **To-Go**

¹⁵ Für die vorangehenden Bereiche der Pumpen-Vorabräumzone, dem Vorabräumtank und der Reinigerumwälzzone werden niedrigere Temperaturen von 40–65 ° vorgegeben.

¹⁶ Ersetzt die vorherige im deutschen Raum gültige DIN Spec 10534, die seit 2023 nicht mehr gültig ist, sowie teilweise die Normen zum gewerblichen Geschirrspülen DIN 10510, 10511, 10512.

Becher für Heißgetränke (Lebensmittelverband Deutschland e. V. 2019) und eine allgemeine **für verschiedene Verpackungen** in (Lebensmittelverband Deutschland e. V. 2020). Diese Leitlinien beruhen auf der Grundlage, dass die Verantwortung für die Sicherheit des Lebensmittels bis zum Abfüllen immer der Verkäufer trägt. Die Annahme von mitgebrachten Behältern ist deshalb freiwillig und sollte immer nach der Risikobewertung des Verkäufers erfolgen. Außerdem werden eine Reihe Hinweise sowie eine Checkliste zum praktischen Umgang gegeben – bspw. eigene Werkzeuge und Bereiche zur Befüllung der Behälter zu verwenden und diese so wenig wie möglich zu berühren (z. B. durch die Abfüllstutzen der Kaffeemaschine).

Die **PPWR stärkt den Einsatz von Mehrwegverpackungen**, in dem sie in Artikel 29 Anteile von 40 % ab 2030 und sogar 70 % ab 2040 für eine ganze Reihe von Verpackungstypen festlegt, für innerstaatliche und innerbetrieblich genutzte Verpackungen wird sogar eine vollständige Umstellung auf Mehrweg gefordert. Allerdings sind Kisten aus PPK explizit davon ausgenommen (Europäisches Parlament 2025), sodass eine Verschiebung von Kunststoffen hinweg hin zu PPK-Einwegverpackungen zu erwarten ist. Es gibt zudem eine Mehrwegangebotspflicht (Artikel 33) für die Gastronomie, von der allerdings Kleinstunternehmer ausgenommen sind.

2.4 Schlussfolgerungen hinsichtlich der Regulierungstiefe verschiedener Verpackungstypen und der Vergleichbarkeit der Systeme

Alle Lebensmittelverpackungen müssen nach EU-Recht grundsätzlich gesundheitlich unbedenklich sein, sie dürfen Lebensmittel nicht in ihren Eigenschaften verändern und müssen unter kontrollierten Bedingungen hergestellt werden. Für Verpackungen aus Kunststoff, insbesondere für Verpackungen aus recyceltem Kunststoff, liegen zusätzlich dazu eine Reihe weiterer Verordnung vor, die es so für PPK nicht gibt, obwohl verschiedene Studien darauf hinweisen, dass Stoffe wie Mineralölkomponenten (CVUA Stuttgart et al. 2012) und PFAS (Langberg et al. 2024; Straková et al. 2021) in bedenklichem Maße auch aus PPK-Verpackungen in Lebensmittel migrieren.

Bild 8 stellt die **wichtigsten Regulierungsinstrumente** sowie ihren Anwendungsbereich geordnet nach ihrem **Verbindlichkeitsgrad** dar. Für Verpackungen aus **Kunststoff** und insbesondere solche, die entweder Rezyklate enthalten und oder für die Wiederverwendung gedacht sind, bestehen **deutlich mehr gesetzliche Anforderungen** (Instrumente mit hohem Verbindlichkeitsgrad) als für Verpackungen aus PPK. Die Einschätzung des Gesamtverbands Kunststoffverarbeitende Industrie (GKV) ist somit nachvollziehbar, dass für Kunststoffverpackungen so detaillierte Vorgaben gelten wie für kein anderes Material (GKV 2022). Besonders hoch sind die Hürden für den Einsatz von **Kunststoffrezyklaten**, insbesondere da durch die Art des Zulassungsverfahrens ein Zeitraum der Rechtsunsicherheit von bis zu 7 Jahren für die produzierenden Unternehmen besteht und das von der EU beschlossene Register für »novel technologies« nicht vorliegt.

Eine **höhere Kreislaufführung von Kunststoff** wird zwar einerseits politisch gewünscht und ist in der PPWR durch das neue Instrument der Rezyklateinsatzquoten verankert, wird andererseits aber durch die Art des Zulassungsverfahrens und die mangelnde Transparenz **erschwert**. Da zusätzlich PPK-

Verpackungen von den vorgeschriebenen Mehrwegquoten ausgenommen wurden und – im Gegensatz zum ursprünglichen Entwurf der PPWR aus dem Jahre 2022 – sich die Verbote für Einwegverpackungen nur auf Kunststoff beziehen (Wacker 2024b), ist **in den nächsten Jahren eher von einer Verschiebung von Kunststoff zu PPK anstatt zu einer nennenswert höheren Kreislaufführung auszugehen**. Derzeit beschränkt sich der PCR-Einsatz in Lebensmittelverpackungen fast ausschließlich auf PET. Eine Ausweitung auf andere Materialien ist nach aktueller Gesetzeslage möglich, aber mit hohen Hürden und wirtschaftlichen Risiken für die Unternehmen verbunden und somit nicht in absehbarer Zukunft wahrscheinlich, zumindest nicht in der breiten Anwendung.

Papierverpackungen mit Lebensmittelanwendung dürfen zwar aus wiedergewonnen Fasern hergestellt werden, sofern diese eine Reihe von Qualitätsanforderungen erfüllen, auch hier liegt aber zumindest für den Demonstrator der Getränkebecher kein geschlossener Kreislauf vor. Grund dafür ist, dass gebrauchte To-go-Becher aus beschichtetem Karton richtigerweise im gelben Sack bzw. der gelben Tonne entsorgt werden (UBA 2025)¹⁷, die Fraktion PPK aus Leichtverpackungen (LVP) aber einer Mehrkomponenten-Erfassung entstammt und somit laut BfR für die Herstellung von Verpackungen mit Lebensmittelkontakt ungeeignet sind (Bundesinstitut für Risikobewertung 2023). Ein Becher-zu-Becher Recycling ist nur möglich für Fehlwürfe, d. h. gebrauchten Einwegbechern, die fälschlicherweise im Altpapier entsorgt werden.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass ein fairer Vergleich der Systeme derzeit nur bedingt möglich ist, da eine echte Kreislaufführung (Closed-Loop oder zumindest zurück in den Lebensmittelsektor) bei Einwegverpackungen aktuell weder bei Kunststoffen noch bei PPK rechtlich möglich ist.

17 In der Realität werden diese zudem in der Regel im öffentlichen Raum entsorgt, wo zumeist keine Abfalltrennung stattfindet und die Becher als Restabfall vom Recycling für Lebensmittelanwendungen ausgeschlossen sind.

	Instrument	Anforderung	Geltungsbereich			
Grad der Verbindlichkeit ↑	HOCH	EU 1935/2004, 2023/2006 (»GMP-Verordnung«)	▪ Gesundheitliche Unbedenklichkeit ▪ Grenzwerte Gesamtmigration ▪ Gute Herstellerpraxis (Qualitätssicherungssystem etc.)			
		EU 852/2004 sowie DIN 10516	▪ Hygienische Verpackung, Lagerung von Verpackung einfache Reinigung und Desinfektion für alle Mehrwegverpackungen			
		EU 10/2011	▪ Grenzwerte spezifische Migration aus Kunststoff ▪ Positivliste zugelassener Stoffe			
		EU 2022/1616 (sowie Änderungsverordnung EU 2025/351)	▪ Ausgangsmaterial (95 % getrennt gesammelte Lebensmittelverpackungen), zulässige Dekontaminationsverfahren ▪ Materialreinheit, Zulassung, Nachweispflichten			
		EU 2025/40 (»PPWR«)	▪ Grenzwerte Substances of Concern, insbesondere PFAS ▪ Rezyklierbarkeit (Design for Recycling), Recyclingquoten ▪ Rezyklateinsatzquoten, Mehrwegangebotspflicht			
		EU 852/2004	▪ Hygienische Bedingung bei der Herstellung und dem Abfüllen von Lebensmitteln			
	MITTEL	DIN EN 1186, 13130, 14233	▪ Messverfahren zur Gesamtmigration (nach EU 1935/2004), zur spezifischen Migration (nach EU 10/2011), zur Hitzebeständigkeit			
		DIN EN 17735, DIN 10522	▪ Prozessparameter für Reinigungsverfahren und Mehrwegverpackungen ▪ Eigenschaften von Mehrwegkisten und -boxen			
		Empfehlungskatalog 36 des BfR	▪ Zulässiges Ausgangsmaterial, Grenzwerte Stoffbeschränkungen Altpapier			
GERING	Leitlinien Lebensmittelverband	▪ Befüllen von kundeneigenen Behältern (BYO)				
		Leitlinien für Kunststoff-Rezyklate im Kontakt mit Lebensmitteln GKV, BDE, bvse	▪ Zulassung und Betreiben von Recyclingtechnologien, Praxishilfen			
	Sourcing Guidelines, Branchenrichtlinie CEPI	▪ Rezyklateignung, Barriereanforderungen, Analytik				

Legende:

	KS-Verpackung (virgin)		KS-Verpackung (Rezyklat)		Einwegverpackung PPK		Mehrwegverpackung (KS)
--	------------------------	--	--------------------------	--	----------------------	--	------------------------

Bild 8: Übersicht der regulativen Instrumente für Verpackungen mit Lebensmittelkontakt mit ihrem jeweiligen Geltungsbereich

3 Grundlagen der Kontamination und Dekontamination in der Kreislaufwirtschaft

Sowohl Mehrwegverpackungen und -behälter aus Kunststoff als auch Kunststoff- und PPK-Abfälle, die zu Rezyklat verarbeitet werden, müssen von Verunreinigungen befreit werden, um eine sichere Wiederverwendung im Lebensmittelkontakt zu gewährleisten. Im Folgenden werden typische Verunreinigungen, mit ihnen verbundene Risiken und die physikalischen, chemischen und biologischen Prozesse bei der Reinigung erläutert. Außerdem werden die Bedingungen für eine hygienisierende Reinigung, besondere Herausforderungen beim Reinigen von Kunststoffen sowie die Rolle materialspezifischer Eigenschaften auf die Machbarkeit und Erfolg der Reinigung diskutiert.

Die Reinigung – ob von Mehrwegartikeln oder von Kunststoffflakes – beruht auf den gleichen grundlegenden physikalisch-chemischen Vorgängen. Ein etabliertes Konzept zur Beschreibung von Reinigungsprozessen ist der **Sinnersche Kreis**, der **vier Schlüsselaspekte** für den Reinigungserfolg nennt: Chemie (Reinigungsmittel), Mechanik (z. B. Spritz- oder Bürstendruck), Temperatur und Zeit (Einwirkdauer). Alle vier Größen wirken zusammen: Schmutz wird durch geeignete Chemikalien gelöst oder emulgiert, mechanische Einwirkung unterstützt das Ablösen, erhöhte Temperatur beschleunigt chemische Reaktionen und reduziert die Haftung und eine ausreichende Zeit stellt sicher, dass die Prozesse vollständig ablaufen. Zusätzlich fungiert Wasser als Trägermedium, welches die Wärme überträgt und abgelöste Schmutzpartikel abtransportiert (IHO 2024). Auf mikroskopischer Ebene laufen bei der Reinigung **verschiedene Vorgänge** ab, abhängig von der Art der Verschmutzung: Lösungsprozesse (wasserlösliche Rückstände wie Zucker oder Salze lösen sich im Wasser), Emulgierung (Fette und Öle werden durch Tenside in fein verteilte Tröpfchen überführt), Dispergierung (feste Partikel werden suspendiert) sowie chemische Umsetzungen (starke Alkaliverbindungen lösen Verklebungen und verseifen Fette, Säuren entfernen Kalk- oder andere Salzablagerungen). Temperatur und Chemie gehen dabei Hand in Hand: Heißes Wasser kann Fette schmelzen und harte Ablagerungen erweichen sowie Klebstoffe anlösen. Mechanische Kräfte – etwa Spritzwasserstrahlen in einer Spülmaschine oder die Reibung in einem Frikationswäscher bei Kunststoffflakes – brechen den Adsorptionsverbund zwischen Schmutz und Oberfläche und entfernen auch anhaftende Partikel oder Biofilme.

3.1 Verunreinigungen und Reinigung von Kunststoff-Mehrwegverpackungen

Wiederverwendbare Kunststoffbehälter vor allem für Lebensmittel weisen nach Gebrauch typischerweise **organische Rückstände** (Proteine, Fette, Kohlenhydrate) auf. Solche Verunreinigungen bergen primär mikrobiologische Risiken. Sie ermöglichen das Wachstum von Bakterien, Schimmel und Hefen, was zu Verderb, unangenehmen Gerüchen oder pathogenem Keimbefall führen kann. Insbesondere in schlecht zugänglichen Ecken oder tiefen Kratzern können sich

Keime ansiedeln und vermehren. Bleiben Getränke- oder Speisereste zurück, können sie verderben und das nächste Füllgut kontaminieren. Insbesondere in den Sommermonaten kommt es oft zur Bildung von Schimmel, bevor die Behälter gereinigt werden können. Unterschieden werden muss einerseits oberflächlicher Schimmel, der durch eine korrekte Reinigung in der Regel entfernt werden kann, und andererseits Schimmel, welcher das Material angreift und verfärbt und die Verpackung dadurch dauerhaft unbrauchbar macht (Bertling et al. 30.01.2025). Darüber hinaus gibt es auch Speisen und Getränke (bspw. Kaffee, Curry), die einen starken Eigengeruch haben, welcher in den Kunststoff übergeht und somit die Reinigung und Wiederverwendung von Mehrwegverpackungen erschwert (Bertling et al. 30.01.2025).

Neben mikrobiellen Gefahren besteht auch das Risiko **chemischer Kontamination**, etwa durch **Reinigungsmittelreste** oder durch **Stoffübergänge aus dem Kunststoff** selbst. Einige Kunststoffe enthalten Additive, Weichmacher oder freie Monomere, die unter ungünstigen Bedingungen in Lebensmittel migrieren können. Die Erhitzung – wie sie beim Spülen auftritt – erhöht generell das Risiko einer Migration unerwünschter Stoffe aus Verpackungen. So kann z. B. bei hohen Spültemperaturen Bisphenol A (BPA) aus Polycarbonat (PC) freigesetzt werden, weshalb BPA-haltige Kunststoffe nicht in Spülmaschinen gereinigt werden sollten. Mechanische Einwirkung z. B. durch sehr abrasive Reinigung oder UV-Einwirkung, die zur Versprödung führt, können dazu beitragen, dass Kunststoffpartikel (**Mikroplastik**) freigesetzt werden.

Soll ein Mehrwegbehälter aus Kunststoff erneut im Lebensmittelkontakt eingesetzt werden, werden zahlreiche hygienische Anforderungen gestellt. Für Kisten sind diese je nach transportiertem Gut (Obst oder Gemüse, Backwaren, Fleisch oder Fisch) in der DIN 10522 festgelegt. In Lebensmittelbetrieben gelten dazu klare hygienische Anforderungen, die in der Regel auch mikrobiologische Tests (»Abklatschtests«) umfassen. In gewerblichen Spülmaschinen werden Temperaturen und Abläufe so gewählt, dass eine weitgehende Keimreduktion erfolgt. Normen wie DIN 10510/10512 bzw. die neue DIN EN 17735 definieren Richtwerte: z. B. mindestens **~60–65 °C Reinigungstemperatur und ≥80 °C im Klarspülgang** um hygienische Sauberkeit zu gewährleisten und maximal 45 °C bei der Vorspülung, um die Koagulation von Eiweißresten zu vermeiden. Alternativ zu dieser thermischen Desinfektion kann – insbesondere in Situationen, in denen Kunststoffteile hitzeempfindlich sind – auch mit etwas niedrigeren Temperaturen und zugesetzten chemischen Desinfektionsmitteln gearbeitet werden. Auch enzymatische Waschmittel könnten die notwendigen Reinigungstemperaturen möglicherweise senken, diese werden bisher aber nur bei Porzellan und Glas eingesetzt und müssten auf ihre Eignung für Kunststoffartikel erst getestet werden (Bertling et al. 30.01.2025).

Wichtig ist, dass alle Bereiche des Spülguts zugänglich und benetzbar sind; komplexe Geometrien oder Toträume erschweren die Reinigung. Die Auswahl der Reinigungschemikalien für Kunststoffobjekte ist eine Optimierungsaufgabe. Einerseits müssen Eiweiße, Fette und andere Lebensmittelreste zuverlässig entfernt werden, andererseits dürfen die Mittel die Kunststoffoberfläche nicht angreifen, um Rissbildung oder Ausbleichen zu vermeiden.

Nach dem Spülen müssen die Behälter vollständig trocknen, da sich auf feuchten Oberflächen schnell erneut Keime bilden. Kunststoffe kühlen aufgrund ihrer niedrigen Wärmekapazität schnell aus, sodass sie häufig nicht vollständig trocknen. Werden feuchte Kunststoffe gestapelt oder verpackt, begünstigt die eingeschlossene Feuchtigkeit ein erneutes Keimwachstum. Eine **vollständige Trocknung** ist notwendig für eine hygienisierende Wirkung (AKGGS 2023). In der Praxis wird das Nachtrocknen durch das Aufheizen des Spülguts oder heiße Luft erreicht. Es existieren auch Zentrifugaltrockner, die die Restfeuchtigkeit durch schnelle Rotation der Objekte entfernen.

3.2 Verunreinigungen und Reinigung von Kunststoff-Rezyklaten

Im Recyclingprozess stammen die Kunststoffe meist aus **PCR-Verpackungen** (z. B. gebrauchte PET-Flaschen oder Verpackungsabfälle der dualen Systeme) und können sehr heterogene Verunreinigungen aufweisen. Typisch sind **organische Rückstände** des Füllguts (Essens- oder Getränkereste), Fremdmaterialien wie Papier (Etiketten), **Klebstoffe** von Etiketten und **Verbundfolien, Farbreste oder Druckfarben, Schmutz** (Erde, Staub) sowie Fremdkunststoffe oder **Metalle**. Diese Verunreinigungen bergen neben Gesundheitsrisiken auch technische Risiken: Bleiben sie im Material, können sie die Qualität und Stabilität des Rezyklats mindern. Klebstoff- und Lebensmittelreste können beim Regranulieren zu Verfärbungen oder Geruch im Kunststoff führen, Schmutzpartikel oder Metallstücke können die verarbeitenden Maschinen schädigen oder im Endprodukt als sichtbare Fehler auftreten.

Kunststoffflakes für die Anwendung in Lebensmittelverpackungen werden im Recyclingprozess üblicherweise bei **~80 °C gewaschen**, um diese Rückstände zu entfernen. Die mikrobielle Dekontamination wird durch das Extrudieren sichergestellt, welches das Material bei mindestens zwei Minuten Kontaktzeit auf 240 °C erhitzt (Eisenträger 25.02.2025). Trotzdem können **chemische Kontaminanten** ein Problem darstellen: Kunststoffabfälle könnten bspw. mit toxischen Chemikalien in Berührung gewesen sein (z. B. Pestizidbehälter oder Ölkannister im falschen Recyclingstrom). Durch das Recycling können solche Substanzen unerwünscht ins Lebensmittel migrieren, falls sie nicht vollständig entfernt werden. Daher erfordern Kunststoff-Recyclingprozesse, die Materialien wieder für Lebensmittelkontakt nutzbar machen wollen, eine sehr effektive Dekontamination. Beim Schreddern der Flakes entsteht ein Mahlstaub (oder Feinabrieb), der an der Mühle abgesaugt und aufgrund der noch anhaftenden Verunreinigungen sowie der fehlenden Sortenreinheit in der Regel thermisch verwertet wird. Der Anteil des **Mikroplastiks**, der danach den Flakes noch anhaftet, kann teilweise in den Abwasserstrom gelangen (Brown et al. 2023), auch wenn während der Kalt- und Heißwäsche Feinabrieb und Schlämme ausgeschleust werden und das Abwasser gereinigt wird.

Bei der Aufbereitung von Kunststoffrezyklaten zu Sekundärrohstoffen liegt der Fokus auf der Entfernung aller Fremdstoffe, die die Materialqualität oder Unbedenklichkeit beeinträchtigen könnten. Der Prozess unterscheidet sich vom Geschirrspülen, ist aber in Teilschritten vergleichbar (**Vorreinigung, Hauptreini-**

gung, Spülen). Üblicherweise beginnt er mit einer Sortierung und Grobreinigung: Störstoffe wie Metalle, Glas oder Nicht-Kunststoffe werden aussortiert (APR 2025; Recycling Today 2025). Anschließend werden die Kunststoffe grobzerkleinert (geschreddert), wodurch sich die Oberfläche für die nachfolgende Wäsche vergrößert. Die Hauptreinigung der Flakes erfolgt in kontinuierlich arbeitenden Waschanlagen. Zunächst kann ein Vorspülen mit kaltem oder lauwarmem Wasser stattfinden, um lose Verschmutzungen und leicht lösliche Reste abzuspielen. Für eine hochwertige Reinigung schließt sich eine Heißwäsche an. Dabei werden die Kunststoff flakes (z. B. PET-Flakes) in einem beheizten Waschmodul typischerweise bei ~80–90 °C mit Wasser, alkalischer Lauge und Detergenzien intensiv gewaschen (Plastic Recyclers Europe 2024). Dieser Schritt entfernt hartnäckige Verunreinigungen: Fette, Öle und Klebstoffe werden im heißen Laugenbad emulgiert oder aufgeweicht, Etiketten lösen sich von den Flakes ab und Pigmente oder Schmutzpartikel werden suspendiert und ausgetragen. Durch sogenannte Friktionswäscher oder Rührwerke kommt eine mechanische Einwirkung hinzu – die Flakes werden dabei untereinander sowie gegen Siebe oder Paddel gerieben, was anhaftenden Schmutz abschabt. Nach der Laugenwäsche folgt meist eine zum Teil mehrstufige Spülung mit klarem Wasser, um Chemikalien und gelösten Schmutz zu entfernen. Am Ende des Waschprozesses stehen saubere Kunststoff flakes, die dann getrocknet werden (z. B. in thermischen Trocknern oder mechanischen Zentrifugen), da für die weitere Verarbeitung trockenes Material benötigt wird. Eine Besonderheit beim Recycling ist, dass die Reinigung nicht mit der Wäsche endet.

In der anschließenden **Extrusion** (Schmelzaufbereitung) werden noch weitere Reinigungseffekte erzielt. Beim Aufschmelzen (**typischerweise 200–280 °C**, je nach Kunststoff) werden verbliebene Mikroorganismen abgetötet. Vor allem aber wird die Schmelze durch Schmelzefiltration von unlöslichen Reststoffen gereinigt. Moderne Extruder verfügen über Filter auf Basis von Metall-Siebwechslern oder kontinuierliche Trommelfiltern, welche Papierfasern, Metallpartikel, Holzsplitter, Gummi und andere Fremdstoffe bis zu sehr kleinen Partikelgrößen zurückhalten. Typischerweise können solche Filtersysteme Kontaminationen von mehreren Prozent im Input bewältigen und Partikel bis in den zweistelligen Mikrometerbereich abscheiden (Kunststoffindustrie Online 2023). Zusätzlich erfolgt oft eine Vakuumentgasung der Schmelze: Unter Unterdruck werden flüchtige Substanzen (Lösemittel, Monomere, Geruchsstoffe) aus der Schmelze entfernt (Gneuß 2025; Coperion 2025). Dieser **thermisch-physikalische Reinigungsschritt** im Extruder trägt wesentlich dazu bei, **geruchsneutrale und hygienisch** unbedenkliche Rezyklate zu gewinnen. Zum Beispiel werden bei PET-Recyclingverfahren im Solid-State-Polykondensationsschritt oder mittels Spezialextrudern Reststoffe so weit entfernt, dass das Rezyklat lebensmitteltauglich wird. Insgesamt ist der Reinigungsprozess beim Recycling aggressiver als bei Mehrwegartikeln – starke Laugen und hohe Temperaturen werden toleriert, da die formale Integrität des Produkts nicht erhalten bleiben muss (da die Flakes anschließend sowieso extrudiert werden). Das Ziel ist ein möglichst reines Polymer als Output. Wichtig ist jedoch, dass auch hier die Bedingungen das Material nicht unnötig schädigen. Bei PET etwa achtet man darauf, die Flakes nicht zu lange über der Glasübergangstemperatur zu halten, um

Schrumpfung oder vorzeitige Kristallisation zu vermeiden. Am Ende des Recycling-Reinigungsprozesses stehen **Rezyklat-Granulate**, die ein hohes Maß an Reinheit aufweisen und für neue Lebensmittelkontaktmaterialien – häufig allerdings in Mischung mit Neuware – genutzt werden.

3.3 Reinigungsrelevante Materialeigenschaften – Spülmaschinen- und Recyclingfestigkeit

Kunststoffe unterscheiden sich in der Reinigung deutlich von z. B. Glas oder Metall. Ein relevanter Unterschied betrifft die **Hydrophobie** vieler Kunststoffe: Unpolare Polymere wie PE oder PP haben wasserabweisende Oberflächen, sodass wässrige Reinigungsflotten sie schlechter benetzen. Daher sind **Tenside** essenziell, um den Wasserkontakt zu verbessern und Schmutz ablösen zu können. Ein zweites Problem ist die **Kratzeranfälligkeit**. Viele Kunststoffoberflächen sind weicher und verkratzen schneller durch mechanischen Abrieb – sei es durch Besteck (im Falle von Tellern/Boxen) oder durch Reinigungsbürsten. In diesen Mikrokratzern können sich Schmutz und Mikroben leichter festsetzen. Eine weitere Herausforderung ist die Dimensionsstabilität unter Hitze. Kunststoffe besitzen je nach Struktur eine **Glasübergangstemperatur** oder Schmelztemperatur, oberhalb derer sie erweichen oder verformen, verziehen oder schrumpfen. Beispielsweise sind dünnwandige Einweg-PET-Flaschen nicht dafür ausgelegt, 70–80 °C in einer Spülmaschine auszuhalten – sie würden sich verformen und unbrauchbar werden. Auch Behälter aus PS oder PLA erweichen schon bei relativ niedrigen Temperaturen (PS $\approx$ 90 °C, PLA $\approx$ 60 °C) und sind *nicht spülmaschinengeeignet*. Außerdem können bestimmte Kunststoffe bei hohen Temperaturen chemisch reagieren: Ein bekanntes Beispiel sind Melaminharz-Geschirre, insbesondere wenn mit Bambusfasern gefüllt – bei >70 °C heißem Befüllen oder Spülen kann Formaldehyd entstehen und in Lebensmittel übergehen, wie Erfahrungen mit Bambus-Melamin-Geschirr zeigten. Ebenso kann PC unter heißer Lauge BPA freisetzen (AKGGS 2023; Finish 2025). Für einen dauerhaften Mehrwegeinsatz im Lebensmittelbereich sollten daher nur Kunststoffe verwendet, die diesen Belastungen standhalten und keine Schadstoffe abgeben.

Laut DIN EN 12875 gilt ein Kunststoffartikel als **spülmaschinenfest**, wenn sein Aussehen und seine Gebrauchstauglichkeit selbst nach vielen maschinellen Spülzyklen unverändert bleibt. In Tests wird dies üblicherweise mit 125 Spülgängen geprüft. Bild 9 zeigt das grafische Symbol für die Kennzeichnung unter Angabe der Prüfzyklen (in diesem Falle 500) nach DIN EN 12875. Ist ein Material nur als »**spülmaschinengeeignet**« oder »**spülmaschinentauglich**« gekennzeichnet, so ist dies **kein exakt definierter Begriff** – er besagt lediglich, dass der Gegenstand das Spülen grundsätzlich übersteht, jedoch sind mögliche Beeinträchtigungen nicht ausgeschlossen. Ein spülmaschinengeeignetes Kunststoffprodukt könnte also nach mehreren Waschgängen Verfärbungen, Versprödungen oder Haarrisse zeigen, die vom Hersteller nicht ausgeschlossen wurden. Verbraucherhinweise raten daher, empfindliche Kunststoffteile (auch wenn als spülmaschinengeeignet deklariert) im oberen Geschirrkorb und mit Schonprogrammen zu spülen, um direkte Hitze und aggressive Bedingungen zu vermeiden.

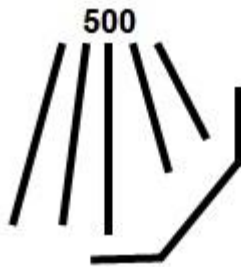


Bild 9: Logo für Spülmaschinenfestigkeit unter Angabe der Prüfzyklen

Für **Mehrwegverpackungen** haben sich einige Kunststoffe als besonders tauglich erwiesen. **PP** ist weit verbreitet – es ist robust, bis ca. 100 °C formstabil, geschmacksneutral und enthält in der Regel keine problematischen Additive. Viele Kisten, Becher, Trinkflaschen und andere Lebensmittelbehälter bestehen daher aus PP. **High-Density Polyethylen (HDPE)** wird für Verschlüsse und dickwandige Behälter eingesetzt; es besitzt eine relativ hohe Wärmeformbeständigkeit (~80–100 °C) und nimmt kaum Wasser auf, allerdings kann es Gerüche annehmen. **PET** wird besonders für Mehrweg-Getränkeflaschen und Becher für Kaltgetränke verwendet. Wiederholte industrielle Laugenwaschungen sind unkritisch (Nielsen et al. 1997). Allerdings zeigt sich in der Praxis, dass PET bei Reinigungstemperaturen über 60 °C nur eingeschränkt geeignet ist (Bertling et al. 30.01.2025). Auch **Polycarbonat (PC)** war früher vor allem für transparente Anwendungen gängig (z. B. wiederverwendbare Wasserflaschen, Kantinengeschirr), wegen seiner hohen Festigkeit und Temperaturbeständigkeit übersteht es übliche Spültemperaturen problemlos. Allerdings hat PC den Nachteil, **BPA** als Monomer zu enthalten und dieses unter bestimmten Umständen freizusetzen, daher wird es im Lebensmittelbereich zunehmend gemieden. BPA-freie Copolyester (bspw. Tritan™) haben daher in den letzten Jahren an Bedeutung gewonnen (Glausitz 2014). Polysulfon (PSU) oder Polyethersulfon (PES) sind hochtemperaturfeste technische Kunststoffe, die ebenfalls spülmaschinenfest sind und in Spezialanwendungen (etwa wiederverwendbare Babyflaschen, Laborgeräte) genutzt werden; auch sie sind BPA-frei, aber (noch) deutlich teurer. Doch auch hinsichtlich verschiedener Alternativen gibt es offene Fragen zu **migrierenden Stoffen**, auch wenn in der Regel keine kritischen Grenzwerte erreicht werden (Zimmermann et al. 2019; Begley 2013; Schmid und Welle 2020).

Für **Einwegverpackungen** mit anschließendem Recycling sind andere Kriterien relevant, weshalb hier der Begriff »**recyclingfest**« verwendet wird. Die drei wichtigsten Prozessschritte des mechanischen Recyclings – Waschen/Reinigen, Zerkleinern und Extrudieren – wirken auf Kunststoffe sehr unterschiedlich. Jeder Schritt hinterlässt charakteristische Spuren im Polymergerüst, welche die Qualität des Rezyklats bestimmen. Beim **Heiß- bzw. Laugenwaschen** liegt der Schwerpunkt auf der Entfernung von Haftetiketten, Fetten und Getränkeresten. Gerade bei PET führt dies leicht zu hydrolytischen Spaltungen in den Esterbindungen: Schon geringe Restfeuchten oder alkalische Medien senken die intrinsische Viskosität (IV) deutlich und begünstigen Kettenabbrüche (Bezeraj et

al. 2025). PP reagiert anders – es ist in wässriger Chemie relativ stabil, doch das heiße Waschbad löst die verbliebenen Antioxidantien aus der Randschicht. Damit verkürzt sich der Oxidationsschutz für die folgenden thermischen Schritte (Knoben et al. 2025). Das anschließende **Zerkleinern** (Schreddern, Mahlen) stellt die Materialien mechanisch unter Schock. Hohe Schlagbelastungen können zum Polymerkettenabbau, zu Mikrorissen, aber auch zur Kristallisation führen und damit die mechanischen Eigenschaften der Polymere ändern. Systematische Untersuchungen dieser Effekte gibt es aber kaum. Die Untersuchung von Ravishankar et al. (2018) zeigt aber, dass bereits geringe Scherkräfte für die Schädigung ausreichen. Außerdem gehen durch den Zerkleinerungsprozess Kunststoffe in Form von Mikro- und Nanoplastik verloren (Brown et al. 2023; Kasper et al. 2025; Swinnerton et al. 2024). Im **Extruder** kumulieren schließlich thermische, mechanische und oxidative Belastungen. Bei PET entscheidet die Restfeuchte, ob vorwiegend Hydrolyse (bei >50 ppm H₂O) oder thermische Kettenspaltung dominiert; beide Mechanismen verringern das Molekulargewicht und bilden Nebenprodukte wie Acetaldehyd, das in Getränkeverpackungen geschmacksrelevant ist (Shen et al. 2025). PP zeigt schon nach wenigen Extrusionszyklen eine starke Erhöhung der Schmelzflussrate; Studien berichten MFR-Anstiege um das Fünffache, bedingt durch radikalische Kettenabbrüche und eine Verbreiterung der Molmassenverteilung (Krämer et al. 2024). Für HDPE lässt sich ein analoger Abbau über den Anstieg des Carbonyl-Indexes nachweisen (Cruz und Zanin 2003). Gewaschene Rezyklate weisen bereits um Größenordnungen kürzere Oxidationszeiten auf, was zusätzliche Stabilisatoren oder Inertgas-Extrusion erforderlich macht (Boz Noyan 2024). PS neigt ab etwa 230 °C zu Depolymerisation: Radikalische Spaltungen erzeugen Styrol-Monomere, verursachen Gelbfärbung und senken die Viskosität; aktuelle Übersichtsarbeiten zum Upcycling belegen diesen Mechanismus ebenso wie neuere Analysen zu thermomechanischer Degradation bei Extrusion (Pin et al. 2023; Cerratti et al. 2023). Ein weiteres Problem beim Recycling ist die **Cross-Kontamination**: Gelangen z.B. PET-Flocken in HDPE-Ströme, verschlechtert sich die Schlagzähigkeit des Polyolefins drastisch, weil die polyester-typische radikalische Degradation katalytisch auf die PE-Matrix wirkt. Ähnliche Synergien gelten für PP-/PET-Mischungen (Gnoffo et al. 2025).

Zusammengefasst **addieren sich beim Einweg-Kreislauf hydrolytische Schäden aus dem Waschschrift, mechanische Vorschädigungen durch das Zerkleinern und scherinduzierte sowie thermo-oxidative Kettenabbrüche beim Extrudieren**. Die Praxis begegnet dem mit gründlicher Vortrocknung (PET, PA), Antioxidantien-Nachdosierung (PE, PP), Schutzgas- oder Vakuumextrusion sowie einem kaskadierten Einsatz der Rezyklate in weniger anspruchsvollen Zielanwendungen. In der Praxis geht man davon aus, dass die meisten Kunststoffe aufgrund der Verunreinigungen **etwa 5- bis 10-mal recycelt** werden können, in Laboruntersuchungen wurden bei entsprechender Reinheit bzw. Dekontamination auch höhere Werte erreicht (Jin et al. 2012).

3.4 Kontamination und Dekontamination beim Papierrecycling

Die Kontaminationen in den Eingangsströmen für das Papierrecycling stammen sowohl aus **papiereigenen Inhaltsstoffen** – gemeint ist hier die eigentliche

Papierherstellung sowie die Papierverarbeitung (Bedrucken, Leimen etc.) – als auch aus externen anhaftenden oder aufgenommenen **Fremdstoffen**.

Sobhani und Palanisami (2025) untersuchen die Rolle papierimmanenter Inhaltsstoffe auf die Kompostierung (»organic recycling«). Denn obwohl Papier biologischen Ursprungs und kompostierbar ist, sind es viele der Zusatzstoffe nicht. Diese Ergebnisse lassen sich auf das stoffliche Recycling übertragen, da auch hier eine Anreicherung dieser Stoffe im Materialkreislauf erfolgt. Insbesondere **Beschichtungen** aus PE, PP, PVDC oder PFAS, die die Beständigkeit des Papiers gegen Umwelteinflüsse (Wasser, Fett) steigern und **Druckfarben** auf Mineralölbasis und Pigmente werden genannt. Zudem erfolgt die Sammlung von Altpapier in der Regel nicht getrennt nach Verpackungen aus dem Lebensmittelbereich und anderen Anwendungen, sondern es erfolgt eine gemischte Erfassung insbesondere im privaten Bereich (blaue Tonne; Papiersorte 5.01 (DIN EN 643)); diese Fraktion wird vom BfR zumindest in unsortierter Form als ungeeignet für Lebensmittelanwendungen bewertet (Bundesinstitut für Risikobewertung 2023).

Es erfolgt nicht nur eine Verunreinigung der verpackten Lebensmittel durch die Verpackung (PPK), sondern umgekehrt verunreinigen **anhaftende Lebensmittel** den Altpapierstrom und können das Recycling erschweren und zu mikrobieller Verunreinigung des erzeugten PPK führen. Johansson et al. (2001) haben das Vorkommen von durch Lebensmittel übertragenen Bakterien bei der Altpapieraufbereitung untersucht. Es sind **Bakterien** vorhanden, wobei sich klare saisonale Abhängigkeiten (in Schweden) zeigten. Durch die Prozessbedingungen, vornehmlich die hohe Temperatur bei der Trocknung, wird die Bakterienanzahl effektiv reduziert. Anhaftende Bakterien können in die Lebensmittel migrieren, was durch geeignete Barrierschichten verhindert werden könnte. **Gesundheitliche Beeinträchtigung sind sehr unwahrscheinlich**, können aber nicht gänzlich ausgeschlossen werden.

PPK erreicht in Deutschland eine durchschnittliche Wiedereinsatzquote von 83 %, bzw. eine Umlaufzahl von 7,7 (FEFCO 2022). Diese Quote wird häufig fälschlich vereinfachend auch auf Verpackungen mit Lebensmittelkontakt übertragen. Zwar können Verpackungen mit Lebensmittelkontakt im PPK-Recyclingstrom erfasst werden, durch die beschriebenen Ursachen (nicht-sortenreine Sammlung, mögliche Kontaminationen) aber nicht ohne weiteres wieder zu Lebensmittelverpackungen verarbeitet werden, d. h. es erfolgt ein **Downcycling**. Bild 10 zeigt, dass zwei Drittel des in Deutschland hergestellten Papiers bereits für Verpackungen genutzt werden, wobei der Anteil der Lebensmittelverpackungen nicht bekannt ist.

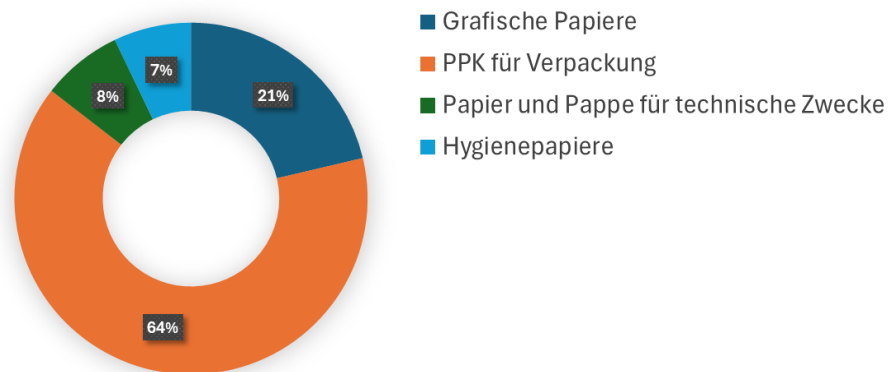


Bild 10: Die Hauptprodukte der Papierindustrie und ihre Anteil an der Produktion (Die Papierindustrie 2025)

Pivnenko et al. (2016) untersuchen die zeitliche Anreicherung und mögliche Entfernung von Kontaminationen (**BPA, DEHP, MOH**) im PPK-Kreislauf mit Hilfe von Materialflussanalysen. Bis ein stationärer Endwert erreicht wird, können Jahrzehnte vergehen (27 Jahre (BPA), 31 Jahre (MOH), 45 Jahre (DEHP), weswegen die heute gemessenen Verunreinigungen noch weiter steigen können, da der stationäre Zustand noch nicht erreicht ist. Darüber hinaus untersuchen die Autoren verschiedene Szenarien, um die Konzentrationen zu verringern (Optimierung der Sammlung, Verbesserung der Entfernung, Verzicht). Sie zeigen, dass die Entfernung dieser Substanzen aus dem Papierkreislauf selbst im optimalen Szenario (Verzicht) ebenfalls sehr lange braucht (15 Jahre (DEHP), 31 Jahre (BPA), 13 Jahre MOH). Trotz der Einführung oder Verschärfung von Grenzwerten kann diese Zeitverzögerung die Eignung von Altpapier für Lebensmittelanwendungen stark einschränken.

Beim Rezyklieren von Kunststoffen für Anwendungen mit Lebensmittelkontakt werden sehr hohe Anforderungen an die Herkunft und Reinheit der Sekundärmaterialien gestellt (siehe Kap. 3). Vergleichbare Vorschriften sind für das Papierrecycling nicht bekannt (Hirsilä 2023). Es finden sich jedoch Belege in Studien und Veröffentlichungen, dass sich **unerwünschte Stoffe** im Papierkreislauf **anreichern** und auch in die verpackten Lebensmittel migrieren können:

Bereits 2002 haben Binderup et al. die Cytotoxizität von Inhaltsstoffen, die aus Papier ausgelaugt wurden, nachgewiesen, wobei die extrahierten Mengen aus Altpapier höher waren als aus Frischware und die Werte aus deinktem Papier niedriger als aus unbehandeltem Papier (Binderup et al. 2002). Ein Forschungsprojekt des Bundesministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz kam zu dem Schluss, dass die meisten gefährlichen Stoffe, die in Altpapier enthalten sind und in Lebensmittel migrieren können, den Behörden nicht bekannt sind (CVUA Stuttgart et al. 2012). Lagerversuche zur **Migration von Mineralölkomponten (MOSH, MOAH)** zeigten, dass die Migration dieser Stoffe die vom **BfR** als gesundheitlich unbedenklich eingestuft Mengen deutlich und dass die Proben aus Lebensmitteln die empfohlenen Höchstmengen **oft um das 10fache oder sogar 100fache übersteigen** (CVUA Stuttgart et al. 2012). Als problematisch wurden zudem Druckerfarbenbestandteile sowie Weichmacher identifiziert. Im Recyclingprozess wurden viele dieser

Stoffe zwar abgereichert, aber nicht im notwendigen Maße. Die Forschungsgruppe hält eine genauere Auswahl von bestimmten Altpapierfraktionen nicht für sinnvoll, da »alle in relevanten Mengen verfügbaren Fraktionen kontaminiert sind« und empfiehlt die Einführung **funktioneller Barrieren** (CVUA Stuttgart et al. 2012). Sofern es sich dabei um Kunststoffschichten handelt, würde dies das Recycling weiter erschweren.

PFAS werden zur Modifikation einiger Spezialpapiere, auch im Lebensmittelbereich, eingesetzt, um wasser- und fettabweisende Eigenschaften zu erzeugen (Umweltbundesamt 2025), sodass es auch zu PFAS-Konzentrationen in Papier mit Recyclinganteil kommen kann. Einer Befragung aus dem Jahre 2023 zufolge werden aber nur noch solche Arten verwendet, die in der Positivliste des BfR enthalten sind (Umweltbundesamt 2025). Studien zu **PFAS-Konzentrationen** in PPK-Verpackungen legen allerdings nahe, dass diese in durchaus problematischen Mengen vorliegen.¹⁸ Einige Verpackungstypen, beispielsweise Mehlverpackungen und Papiertüten, überschreiten die in der PPWR mit 250 ppb festgeschriebenen Grenzwerte (Europäisches Parlament 2025) mit bis zu 952 ppb deutlich (Langberg et al. 2024; Straková et al. 2021).

Biedermann und Grob (2010) kommen zu einem ähnlichem Schluss: Kohlenwasserstoffe (bis zu C₂₀) können bei engem Kontakt leicht **innerhalb weniger Wochen** in die Lebensmittel diffundieren, wodurch Konzentrationen über den empfohlenen Grenzwerten erreicht werden.

¹⁸ Eine Studie zu Lebensmitteleinwegverpackungen aus sechs europäischen Staaten zeigte, dass alle der untersuchten wasserabweisenden Verpackungen aus PPK und Pflanzenfasern PFAS enthielten (Straková et al. 2021). Eine norwegische Studie fand auch in einigen anderen Verpackungstypen, beispielsweise Mehlverpackungen und Papiertüten PFAS-Konzentrationen, die in der PPWR mit 250 ppb festgeschriebenen Grenzwerte Europäisches Parlament 2025 mit bis zu 952 ppb deutlich überschreiten Langberg et al. 2024.

4 Vergleich der Systeme

In diesem Kapitel werden die technischen Prozesse zur Kreislaufführung beschrieben. Dabei stehen die **Energieaufwände** und **Wasserverbräuche** im Fokus. Darüber hinaus wird auch die bei der Kreislaufführung der Verpackungen erreichte **Zirkularität** (Gesamtausbeute¹⁹) betrachtet.

4.1 Die Rückführung in den Systemen

Einweg-Verpackungsabfälle werden in Deutschland im Wesentlichen über verschiedene Sammelsysteme als **Abfall** erfasst und der Verwertung zugeführt: Leichtverpackungen (LVP) aus Kunststoff, PPK, Metallen und Verbundmaterialien über die dualen Systeme (gelber Sack/gelbe Tonne), Papier-, Pappe- und Kartonverpackungen im Privatbereich über die Altpapiersammlung (blaues System) und im gewerblichen Bereich mit hohem Altpapieraufkommen (Supermärkte, Discounter) durch spezielle Sammelsysteme, Altglascontainer zur getrennten Erfassung von Glasverpackungen und nicht bepfandeten Einwegflaschen, bepfandete Einwegflaschen und -dosen über ein Bringsystem bei Supermärkten, Discountern und Getränkehändlern sowie die Getrenntsammlung von gewerblichen Verpackungsabfällen. Darüber hinaus gelangen viele Verpackungsabfälle auch in den Restabfallpfad, vor allem im To-go-Bereich. Die Rückführung in den Kreislauf geschieht im Einwegsystem über das Recycling. Es umfasst mehrere aufeinanderfolgende Prozessschritte, die darauf abzielen, Abfälle effizient zu sammeln, zu sortieren, aufzubereiten und letztendlich wiederverzuwenden und den nicht-verwertbaren Anteil zu entsorgen. Besonderes Augenmerk liegt dabei auf den Schritten zur Aufreinigung des Stoffstroms, um hochwertige Rezyklate zu gewinnen. Eine Besonderheit beim Recycling von PPK ist, dass die Aufbereitung integriert erfolgt, also nicht zuerst ein Rezyklat hergestellt wird, das dann mit Neuware vermischt wird, sondern in einem kombinierten Prozess aus Altpapier und Frischfaser das PPK-Produkt hergestellt wird.

Für die Rezyklate aus den in dieser Studie betrachteten Einwegverpackungen sind die typischen **Verwertungspfade** in Tabelle 2 dargestellt, die Einstufung in der Spalte »Lebensmittelkontakt« ergibt sich aus der in Kapitel 2 dargestellten Rechtslage sowie den Prozess erläutungen in den folgenden Kapiteln.

¹⁹ Zirkularität oder Gesamtausbeute meint hier den Anteil an Material, der im Kreis geführt wird, unabhängig davon, ob dies durch Wiederverwendung oder Recycling geschieht. Es gibt komplexere Zirkularitätsmaße wie den MCI der Ellen MacArthur Foundation, welche die Input- und Outputseite betrachten, die hier aber nicht verwendet werden (EMF 2015).

Tabelle 2: Verwertungspfade von Rezyklaten aus Einwegverpackungen und ihre Eignung für den Lebensmittelkontakt. (n.r. = nicht relevant)

Objekt	Pfad	Verwertung	Lebensmittelkontakt
Becher (KS)	LVP	stofflich	nein
	Restabfall	thermisch	n. r.
Becher (PPK)	LVP	stofflich	nein
	Blaues System	thermisch/stofflich (abhängig von der Papiermühle, Verteilung unklar)	unklar
	Restabfall	thermisch	n. r.
Box (Karton)	Gewerbeabfall	stofflich	eingeschränkt (wegen mech. Festigkeit)

Im **Mehrwegsystem** werden die Verpackungen nicht zu Abfall, sondern bleiben im Eigentum von Befüllern oder Poolbetreibern. Die Rückführung der genutzten Verpackungen geschieht über privatwirtschaftliche Sammelsysteme, eine kommunale Sammlung existiert nicht. Deutschland verfügt bundesweit über ein dichtes Netz etablierter Mehrwegsysteme – vom traditionellen Pfandflaschen-Pool über Pools für Mehrwegkisten für Obst und Gemüse, Fleisch und Backwaren bis hin zu dynamisch wachsenden To-go-Lösungen für Becher und Behälter. Daten zum Anteil von Nutzungen im Mehrwegsystem existieren für den Bereich der **Getränkeflaschen** – hier liegt die Gesamt-**Mehrwegquote mit 33,5 %** (Caye et al. 2025) weiterhin deutlich unter dem im deutschen Verpackungsgesetz angestrebten Ziel von 70 % (VerpackG 2021). Besonders schnell verbreiten sich digitale, pfandfreie Konzepte wie Vytal, weil sie den Nutzerinnen und Nutzern eine einfache Ausleihe und flexible Rückgabe ermöglichen (Cendon Garcia 2025). Zugleich exportieren deutsche Anbieter ihre Mehrweg-Modelle zunehmend in Nachbarländer, während internationale Unternehmen wie Loop von Terra Cycle oder CLUBZERØ das Thema Mehrweg in den europäischen Einzelhandel und Bürocatering-Bereich tragen. Trotz dieser Dynamik mangelt es noch an belastbaren, durchgängigen Daten zu den tatsächlichen Nutzungen und Umlaufzahlen, weshalb Politik und Forschung die Wirkung der Systeme bislang nur eingeschränkt bewerten können.

4.2 Umrechnung auf gleiche Bezugsgrößen

4.2.1 Umrechnung auf den Output des Gesamtsystems

Für **Einwegsysteme** werden im Folgenden die Energie- und Wasserverbräuche auf die Menge des tatsächlich im Kreislauf geführten Materials bezogen. Rechnerisch entspricht dies dem Anteil vom Gesamtverbrauch, der eine bestimmte Prozessstufe i erreicht ε_{i-1} , multipliziert mit dem inputbezogenen Energie- und

Wasserverbrauch dieser Stufe $E_{m,i}$ bzw. $V_{m,i}$, dividiert durch die **Zirkularität ε_{ges}** . Die Zirkularität entspricht dabei der Gesamtausbeute über alle Kreislaufschritte oder der Wiedereinsatzquote in die Produktion, ohne zu berücksichtigen, ob die Qualität für die Verwendung für die ursprüngliche Anwendung in Bezug auf Lebensmittelkontakteignung oder werkstoffliche Eigenschaften genügt:

$$E_{m,Output} = \frac{\sum_{i=2}^n (\varepsilon_{i-1} \times E_{m,i})}{\varepsilon_{ges}} \quad (1)$$

$$V_{m,Output} = \frac{\sum_{i=2}^n (\varepsilon_{i-1} \times V_{m,i})}{\varepsilon_{ges}} \quad (2)$$

Als Beispiel dient die Berechnung des spezifischen, outputbezogenen Energiebedarfs für die LVP-Sammlung. Dabei wurden die Prozessschritte Sortierung, Aufbereitung und Formgebung berücksichtigt, wobei der letzte Schritt als verlustfrei angenommen wurde, sodass der Anteil vom Verbrauch, der die Prozessstufe erreicht, gleich der Zirkularität ist. Es ergibt sich bspw. mit den Daten aus Tabelle 5 und obiger Gleichung:

$$E_{m,Output;LVP} = \frac{0,648 \times 0,07 + 0,75 \times 0,312 + 1,30 \times 0,232}{0,232} = 2,52 \frac{kWh}{kg}$$

Der spezifische, outputbezogene Wasserbedarf gemäß Gleichung 2 berechnet sich analog.

Für die **Mehrwegsysteme** entspricht der Anteil des insgesamt umlaufenden Verpackungsmaterials, das in die Reinigung gelangt, der **Rücklaufquote**, während die Zirkularität der Rücklaufquote abzüglich des Anteils der während der Reinigung ausgesonderten Kisten entspricht. Diese Form der Zirkularität vernachlässigt, dass die ausgesonderten Verpackungen noch dem Recycling zugeführt werden können, allerdings dann mit anderen Verbrauchswerten, weshalb dieser Aspekte hier nicht berücksichtigt wird. In der Regel werden Schwund und Aussonderung in der Umlaufzahl n zusammengefasst.

$$E_{item,Output} = \frac{E_{item,input}}{\varepsilon_{return} \times (1 - \varepsilon_{Sorting out})} \approx \frac{E_{item,input}}{\left(1 - \frac{1}{n}\right)} \quad (3)$$

$$V_{item,Output} = \frac{V_{item,input}}{\varepsilon_{return} \times (1 - \varepsilon_{Sorting out})} \approx \frac{V_{item,input}}{\left(1 - \frac{1}{n}\right)} \quad (4)$$

4.2.2 Umrechnung auf das Nennvolumen als Bezugsgröße

Die im Folgenden bestimmten Verbräuche für Recyclingprozesse im Einwegkreislauf, die in kWh/kg bzw. L/kg Output angegeben werden, sowie die Reinigungsvorgänge im Mehrwegkreislauf, die normalerweise auf einen Spülvorgang oder ein einzelnes Spülgut bezogen werden, müssen auf eine **einheitliche Bezugsgröße** umgerechnet werden, die einen sinnvollen Vergleich erlaubt. Im Rahmen dieser Studie wird dafür das Nennfüllvolumen verwendet. Andere Möglichkeiten wären die Umrechnung pro Masse Verpackungsmaterial

oder die zu reinigende Oberfläche. Das Nennfüllvolumen wurde als Bezugsgröße ausgewählt, weil es am besten die Kernfunktion der Verpackung repräsentiert, nämlich die Aufnahme einer entsprechenden Gutmenge. Diese Annahme entspricht nicht zwingend auch dem Gesamtnutzen einer Verpackung, da sie vernachlässigt, dass beispielsweise Mehrwegsysteme häufig bruchstärker sind oder aufgrund der zerstörungsfreien Kreislaufführung mit Zusatzfunktionen (z. B. RFID) ausgestattet werden können.

Bild 11 und Bild 12 geben die in der Literatur gefundenen Spannweiten von Massen und Nennvolumen für Boxen und Becher unterschieden nach Einweg und Mehrweg wieder. Bei der Auswertung von Einwegbechern wurden solche aus PPK und Kunststoff berücksichtigt, da diese keine systematischen Unterschiede im Verhältnis von Masse zu Volumen zeigten, bei Einwegboxen wurde nur PPK berücksichtigt. Mehrwegsysteme waren immer aus Kunststoff. Aus den durch den Ursprung gehenden Ausgleichsgeraden lassen sich grobe Abschätzungen für die **spezifischen Materialaufwände** (Masse/Nennvolumen entspricht der Steigung $\Delta m / \Delta V$ der jeweiligen Geraden) je Verpackungstyp entnehmen. Diese dienen für die Einwegsysteme zur Umrechnung der massenbezogenen Werte in volumenbezogene Werte (Gleichung 5 und 6).

$$E_{V.Output} = E_{m.Output} \times \Delta m / \Delta V \quad (5)$$

$$V_{V.Output} = V_{m.Output} \times \Delta m / \Delta V \quad (6)$$

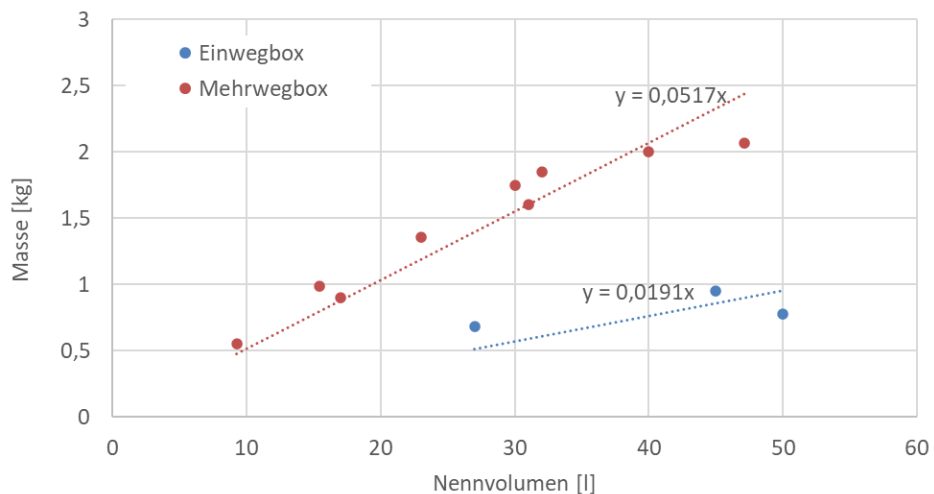


Bild 11: Masse über Nennvolumen für Einweg- (PPK) und Mehrwegboxen (PP, HDPE) [Eigene Darstellung auf Basis von Daten verschiedener Online-Plattformen]

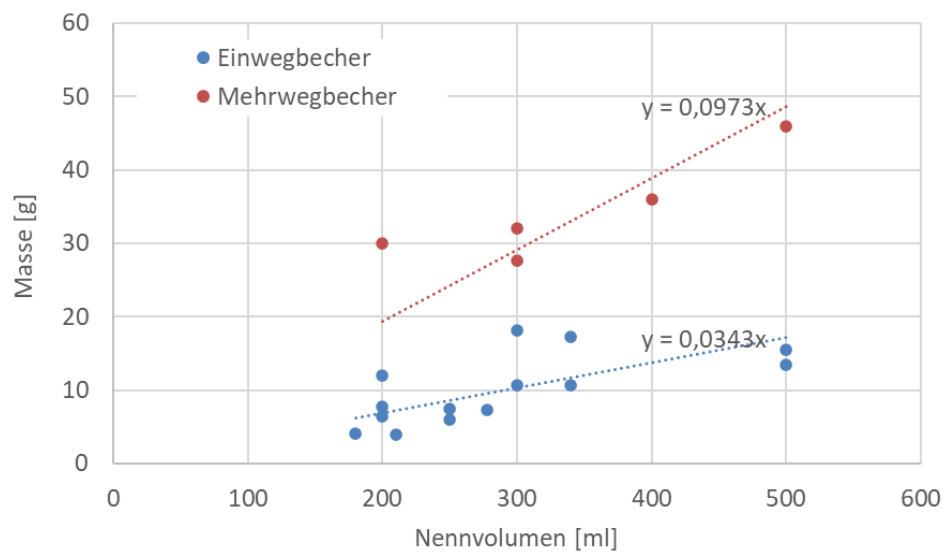


Bild 12: Masse über Nennvolumen für Einweg- (PPK, PPK beschichtet, PE, PET, PS) und Mehrwegbecher (PP)
[Eigene Darstellung auf Basis von Daten verschiedener Online-Plattformen]

Tabelle 3 leitet aus dieser Darstellung zunächst den im weiteren Verlauf verwendeten **Umrechnungsfaktor** von Material zu Nennvolumen für Einwegverpackungen ab: 0,0191 kg/L Verpackungsgewicht für Einwegboxen und 0,0343 kg/L für Einwegbecher, welche den Vergleichen in den folgenden Unterkapiteln zugrunde liegt.

Tabelle 3: Materialaufwand von Einweg und Mehrwegverpackungen

Objekttyp	Einweg	Mehrweg	Verhältnis Mehrweg / Einweg
Box	0,0191 kg/L	0,0517 kg/L	2,7
Becher	0,0343 kg/L	0,0973 kg/L	2,8
Verhältnis Becher/Box	1,8	1,9	

Darüber hinaus zeigt Tabelle 3 das **Verhältnis des Materialaufwands** bei gleichem Volumen für die beiden Systeme und die beiden Verpackungstypen. Einerseits kann abgeleitet werden, dass der Materialaufwand bei Mehr- im Vergleich zu Einwegverpackungen pro Volumen etwa dreimal so hoch ist.²⁰ Auch wenn sich dieser Materialaufwand durch die hohen Umlauffzahlen der Mehrwegsysteme rechtfertigt, muss er bei einem fairen Vergleich berücksichtigt werden (vgl. Kapitel. 5.4).

²⁰ Bei dieser Betrachtung ist nicht berücksichtigt, dass der Materialaufwand beim Mehrweg über viele Nutzungen umgelegt wird. Würde sich die Bewertung der Systeme allein auf den Materialaufwand stützen, sind Mehrwegsysteme bereits ab drei Umläufen im Vorteil.

Weiterhin wird aus Tabelle 3 deutlich, dass sich der Materialaufwand pro Volumen von den großen Boxen zu den kleinen Bechern – unabhängig davon, ob es sich um Einweg- oder Mehrwegsysteme handelt – etwa verdoppelt. Diese Verhältnisse sind relevant, wenn in Kapitel 5.4 die tatsächlich erreichte Zirkularität verglichen wird und in Kapitel 5.5 die Effizienz der Reinigung von Bechern und Boxen verglichen wird.

Für die **Mehrwegsysteme** ist eine Umrechnung der Werte je Spülgang auf das Nennvolumen erforderlich. Da für die Mehrwegreinigungsprozesse explizite Informationen zu den Volumen der gereinigten Gebinde vorlagen, war es möglich, die volumenbezogenen Energieverbräuche direkt zu bestimmen und daraus den durchschnittlichen volumenbezogenen Wasser- und Energieverbrauch zu bestimmen (vgl. Kapitel 614.5.2 und 4.5.3).

4.3 Kreislaufführung von Einwegverpackungen aus Kunststoff

Produktion, Abfallaufkommen und stoffliche Verwertung

Im Verpackungssektor wurden in Deutschland 2023 insgesamt 3,84 Millionen Tonnen (oder Megatonnen, Mt) Kunststoff eingesetzt. Das Aufkommen an **Postconsumer-Kunststoffabfällen** im Verpackungssektor betrug im selben Jahr **3,07 Mt** entsprechend 79,9 % (BKV 2024). Die Differenz zum Verbrauch dürfte durch Exportüberschüsse, langfristigem Verbleib in den Haushalten sowie im geringen Maße durch Littering erklärbar sein, dennoch stehen diese Mengen der Kreislaufwirtschaft nicht zur Verfügung. Die erfassten Abfälle gliedern sich auf in 1,97 Mt haushaltsnahe Verpackungsabfälle und 1,11 Mt gewerbliche Abfälle (BKV 2024). Von den erfassten Verpackungsabfällen werden über den LVP-Pfad, die getrennte Sammlung von Einwegflaschen und getrennt gesammelte Gewerbeverpackungen insgesamt **ca. 2,49 Millionen Tonnen entsprechend 64,8 % der stofflichen Verwertung zugeführt**. Die Differenz zwischen den erfassten Abfällen und denen, die einer Verwertung zugeführt werden, gehen direkt in die energetische Verwertung, befinden sich im haushaltsnahen Bereich vor allem im Restabfall oder werden ohne Nachweis des Recyclings exportiert. Bei den gewerblichen Abfällen befinden sich die Verluste in den Gewerbemischabfällen sowie den gemischten Bau- und Abbruchabfällen.

Von den zugeführten Mengen werden nach einer Sortierung laut BKV **1,59 Millionen Tonnen (41,4 %) tatsächlich stofflich verwertet** (LVP-Pfad 0,63 Mt, Einwegflaschensammlung 0,33 Mt, Getrenntsammlung von gewerblichen Verpackungsabfällen 0,63 Mt) (BKV 2024)).

4.3.1 Generische Betrachtung zu Leichtverpackungen (LVP)

Im Folgenden wird der LVP-Pfad ausgehend von den ihm zugeführten Mengen detaillierter beschrieben, da sich die Aufwände und Zirkularität bspw. im Vergleich zur Verwertung der weitgehend sortenreinen Einwegflaschenfraktion oder des getrennt gesammelten Gewerbeabfalls deutlich unterscheiden, gleichzeitig dieser Pfad für das Becherrecycling aber besonders relevant ist.

I Sortierung

Im ersten Schritt, der Sortierung, findet nach der Öffnung von Abfallsäcken und ggf. einer Grobzerkleinerung (Schredder) eine Trennung mittels **Rotations-sieben** nach Größe statt. Anschließend werden durch **Windsichter** und **Magnetabscheider** Eisenmetalle und Folien gewonnen. Es schließen sich **Wirbelstromabscheider**, ballistische Separatoren und **NIR-Trennung** an, bevor final noch eine manuelle Nachsortierung erfolgt. In Bezug auf Kunststoffe werden üblicherweise Fraktionen mit einem jeweils hohen Anteil von HDPE, PET, PP, PS, Folien und Mischkunststoffe erzeugt, die den seitens der DKR festgelegten Mindestspezifikationen entsprechen müssen. Die Fraktionen werden mit Stahlbändern balliert und der weiteren Aufbereitung zugeführt (Bulach et al. 2022; Kaitinnis 2019; Schyns und Shaver 2021; Kasper et al. 2025).

Knappe et al. (2021) gehen von einer etwas höheren Ausbeute aus der Sortierung von ca. 60 % aus. Für die Kunststoffe PE liegt dieser Wert bei ca. 50 %, für PP bei 42 % und für PS bei 38 %. PET wird zu etwa 70 % als Mischfraktion aussortiert. Von den wieder gewonnenen Kunststoffen gelangen insgesamt mehr als die Hälfte (50,4 %) in die Mischfraktion, die vor allem als Substitut für Holz oder Beton Anwendung findet. Etwa 49,6 % finden sich in Zielfraktionen, die auf die Wiedergewinnung von Einzelpolymeren abzielen.

Ein detaillierte Ökobilanzstudie des Öko-Instituts zur Leistungsfähigkeit der dualen Systeme weist für die Sortierstufe eine stoffliche Verwertungsquote über alle Kunststofffraktionen von 49,4 % aus (Bulach et al. 2022). Wesentliche Verluste entstehen über die Mischkunststoff-Fraktion, die zu 75 % aus Kunststoff bestehen und die Sortierreste (die immerhin noch 49 % Kunststoff enthalten) und die vollständig der Verbrennung zugeführt werden (Bulach et al. 2022).

Daten von Kaitinnis zu einer Sortieranlage des Unternehmens Meilo bestätigen diese Daten auch für eine einzelne Anlage (Kaitinnis 2019). Insgesamt führt die Sortierung üblicherweise zu mehreren Fraktionen, von denen die meisten im Wesentlichen aus Kunststoff bestehen. Der DKR-Katalog umfasst 20 verschiedene Spezifikationen; das verwendete Sortierspektrum ist bundesweit nicht einheitlich geregelt (Kasper et al. 2025; Knappe et al. 2021). Die einzelnen Kunststofffraktionen unterscheiden sich in den erreichbaren Ausbeuten deutlich, so liegen die Werte für PE, PP und PS oberhalb, die für PET deutlich unterhalb der durchschnittlichen stofflichen Verwertungsquote.

Mit der Ausbeute des Sortierschritts von ca. 49,4 % bezogen auf den Input ergibt sich insgesamt **nach der Sortierung eine Zirkularität von noch 31,7 %** bezogen auf den ursprünglichen Kunststoffverbrauch (vgl. Bild 13).

Die Sortierung findet in der Regel **trocken** statt, der **Energieverbrauch** umfasst im Wesentlichen Strom für die Trenntechnik, er wird mit ca. **0,05 bis 0,09 kWh pro Kilogramm Input-Material** angegeben (Bulach et al. 2022; Kaitinnis 2019; Schyns und Shaver 2021; Kasper et al. 2025; Jeswani et al. 2021; Knappe et al. 2021; BKV 2024).

II Aufbereitung (Zerkleinern, Waschen, Trocknen) und Regranulation (inkl. Schmelzefiltration)

Im Rahmen der Aufbereitung werden hier nur etablierte mechanische Verfahren betrachtet, alternative Routen wie das chemische Recycling werden aufgrund ihrer bisher geringen praktischen Relevanz nicht berücksichtigt.

Die in Ballen gepressten Sortierfraktionen werden einer Aufbereitungsanlage zugeführt. Die Kunststoffe werden dort zunächst grob zerkleinert und erneut mit Magnet- und Wirbelstromabscheidern von Metallen sowie mittels Windsichtung und Schwimm-Sinktrennung von Leicht- und Schwergut befreit und in dichtespezifische Fraktionen aufgeteilt. Die beiden wichtigen Verpackungskunststoffe PE und PP lassen sich aufgrund ihrer sehr ähnlichen Dichte durch Schwimm-Sink-Verfahren nicht separieren. Hier sind **optische Sortierverfahren** erforderlich (Knappe et al. 2021). Anschließend wird das Material mittels **Nassschneidmühlen** weiter zerkleinert, so dass Flakes entstehen. Diese werden in zwei Stufen **zunächst kalt und dann heiß gewaschen**. Bei der Reinigung der Flakes ist auch die Entfernung von Gerüchen wichtig. Hierfür sind je nach Polymertyp spezifisch angepasste Reinigungsmittel erforderlich (Roosen et al. 2022). Die Flakes werden entwässert und getrocknet. Ein Teil der Flakes wird als Feingut abgetrennt oder agglomeriert und bspw. für Anwendungen als Betonsubstitut verwendet. Der Hauptstrom der Flakes wird mittels optischer Sortierung (VIS, RGB) und Separation mittels Druckluftdüsen in die verschiedenen Farben aufgetrennt.

Die gereinigten Mahlgüter, die nicht als Agglomerate oder Hilfsstoffe (wie bspw. EPS) direkt verwendet werden, werden im nächsten Schritt mittels eines **Extruders** regranuliert (Bulach et al. 2022). Es werden ggf. Frischmaterial oder Additive zugefügt, um thermo-oxidativem und scherinduziertem Kettenabbau, -verzweigung und -vernetzung entgegenzuwirken. Dabei sind nicht nur verbleibende Fremdpolymere in der Sortierfraktion ein Problem, sondern auch Stoffe, die im Zielkunststoff selbst noch aus seinem ersten Leben enthalten sind: Pigmente, Druckfarben, Etiketten, Klebstoffe, Trennmittel etc. Diese können Abbaureaktionen oder Vernetzungen katalysieren (Schyns und Shaver 2021). Um die Verunreinigungen zu entfernen, hat sich der Einsatz von Schmelzefiltern etabliert. Dabei handelt es sich um Lochfilter oder Drahtgewebe, welche die Schmelze passieren muss. Dieser Schritt führt zu weiteren, wenn auch geringen Verlusten an Polymer und erhöht den Energieaufwand.

Eine neuere Untersuchung von Kasper et al. (2025) zeigt für das Recycling von Polypropylen, dass auch vom Zielmaterial bei der Aufbereitung etwa 15 % verlorengeht. Die größten Leckagen traten dabei bei Nasszerkleinerung, Friktionswäsche und mechanischer Trocknung auf. Insgesamt gelangten etwa **3,9 % des Inputs als Mikroplastik in den Abwasserpfad**. Das Mikroplastik wird gemeinsam mit anderen Verunreinigungen mithilfe eines Flockungsmittels in einer Flotationsanlage zum großen Teil (97–99 %) abgetrennt (Kasper et al. 2025). Jeswani et al. (2021) geben für den Aufbereitungs- und Regranulations-schritt eine Ausbeute von 67 % an, wobei sie nicht ausführen, wie hoch der Anteil an Verunreinigungen im Input ist. Knappe et al. (2021) nehmen für die

Ausbeute des Aufbereitungs- und Regranulationsschrittes 85 % an, Larrain et al. (2021) berichten für verschiedene Polymertypen Werte von 82 bis 94 %.

Aufgrund der chemischen und physikalischen Kräfte, die während der Extrusion zur Regranulation und dem nachgelagerten Verarbeitungsprozess wirken, führt das mechanische Recycling häufig zu einer Verringerung von Zugfestigkeit und der Bruchdehnung bei PP, der Zugfestigkeit bei HDPE, der Bruchdehnung bei LLDPE, der Schlagzähigkeit bei rPP und einer Vielzahl weiterer Probleme bei PET. (Schyns und Shaver 2021). **Diese Verschlechterung der Polymereigenschaften zusammen mit verbleibenden Verunreinigungen führen dazu, dass die Neuware durch Rezyklat nicht zu 100 % ersetzt werden kann.** Üblich sind Substitutionsfaktoren von 95 % oder niedriger (Bulach et al. 2022). Jeswani et al. (2021) berechnen auf Basis von Marktpreisen einen Substitutionsfaktor von nur 50 %.

Im Folgenden legen wir die Daten von Bulach et al. (2022) zugrunde, aus denen sich über die gesamte Prozesskette vom Sortieroutput bis zum Sekundärrohstoff für die Aufbereitungs- und Regranulationsstufe eine Ausbeute von 73 % abschätzen lässt (Tabelle 4). Bezogen auf die ursprünglich produzierte Menge verbleiben **nach der Aufbereitung und Regranulation noch 23,2 %** im Kreislauf.

Meyer et al. (2009) haben die Höhe und Struktur des Energieverbrauchs in Recyclingunternehmen in NRW untersucht. Sie geben für den Energieverbrauch Werte zwischen 0,19 und 0,45 kWh/kg für den Stromverbrauch an, wobei der Stromverbrauch über 95 % des Endenergieaufwandes ausmacht. Sie unterscheiden bei den Unternehmen allerdings nicht, ob es sich um Sortier- oder Aufbereitungsanlagen handelt und ob die Endprodukte Sortierfraktionen, Agglomerate, Regranulate oder Formteile sind. Ohne Angaben zu den Prozessschritten und der erreichbaren Ausbeute können diese Daten daher nur eine grobe Orientierung geben. Gandhi et al. (2021) modellierten mit SIMAPRO 7.1 den fossilen Energiebedarf auf nur 0,19 kWh pro Kilogramm Rezyklat für HDPE. Larrain et al. (2021) führten eine detaillierte techno-ökonomische Modellierung von Aufbereitung und Regranulation (ohne Sammlung und Sortierung) durch; sie berechnen Energie- und Frischwasserverbräuche von 0,72 kWh und 0,28 L für PP, 0,60 kWh und 0,15 L für PS und für PE-Filme von 0,93 kWh und 0,34 L pro Kilogramm Input.

Für den Stromverbrauch und Frischwasserbedarf bei der Aufbereitung und Regranulation sind Werte von 0,46 bis 0,71 kWh bzw. 0,5 L pro Kilogramm Input typisch (Bulach et al. 2022; Knappe et al. 2021). **Die polymerspezifischen Werte von Bulach et al. (2022) sind in Tabelle 4 zusammengestellt.**

Meyer et al. (2009) führen den – verglichen mit PPK und Metallen – hohen spezifischen Energieverbrauch von Kunststoffen auf den Aufwand bei der Zerkleinerung zurück. Es darf aber davon ausgegangen werden, dass auch der Aufwand zur Erwärmung des Reinigungswassers und die nachgelagerte Trocknung einen großen Beitrag zum Gesamtenergieverbrauch leisten (Gandhi et al. 2021). Die verfügbaren Daten beruhen letztlich auf persönlichen Auskünften sowie Angaben des DSD aus 2015 (Dehoust et al. 2016), die aber auf weitere

ältere Quellen verweisen und kaum vollständig nachvollziehbar sind. In der Literatur gibt es Daten, die die Energieverbräuche bestätigen, aber auf eher höhere Wasserverbräuche hinweisen. So geben Uekert et al. (2023) Stromverbrauch und Frischwasserbedarf u. a. für HDPE von 0,43 kWh und 0,87 L, für LDPE von 0,83 kWh und 1,00 L, für PP von 0,43 kWh und 1,06 L jeweils pro Kilogramm Output an. Eigene Erhebungen an einer modernen Aufbereitungs- und Regranulationsanlage lassen zukünftig verbesserte Ausbeuten bei gleichzeitig steigenden Verbrauchswerten erwarten (Daten können aus Geheimhaltungsgründen nicht veröffentlicht werden).

Tabelle 4: Wasser- und Energieverbrauch pro Kilogramm Input in die LVP-Aufbereitung, effektive Ausbeute (korrigiert um den Substitutionsfaktor)

Zielmaterial	Energiebedarf [kWh/kg]	Wasserbedarf [L/kg]	Effektive Ausbeute [%]
PE, PP	0,72	0,5	86
PET (aus LVP)	0,69	0,5	87
PS	0,58	0,5	61
Folien	1,23	0,5	81
MKS	0,71	0,5	40
Mittelwert über alle Fraktionen	0,75	0,5	73

III Konversion: Injection Moulding, Blow Moulding etc.

Das Recycling führt zu Regranulaten. Um den Kreislauf zu schließen, ist eine erneute Formgebung erforderlich. Je nach Anwendung kann es sich dabei um Spritzgießen, Extrusion, Blasformen oder andere Verarbeitungstechniken handeln. Typische Werte für die Energieverbräuche können bspw. Kent (2011) entnommen werden:

- Spritzgießen: 0.9 bis 1.6 kWh/kg
- Extrusion: 0.4 bis 0.6 kWh/kg
- Blasformen: 2.0 bis 2.6 kWh/kg

Diese Energie macht damit einen erheblichen Anteil der über den gesamten Kreislauf aufzuwendenden Energie aus. Cottafava et al. (2021) et al. geben in ihrer Studie für Becher Werte von 1,21 kWh für PP, 0,93 kWh für PLA und 1,9 kWh für PET jeweils bezogen auf ein Kilogramm Produktionsmenge an. Diese Werte liegen innerhalb der oben gezeigten Bereiche.

IV Gesamtschau

Der Kunststoffstrom im LVP-Pfad verringert sich über den Kreislauf von der Produktion bis zum **Wiedereinsatz des Rezyklats auf 23,2 % der ursprünglichen Masse** (Bild 13).²¹

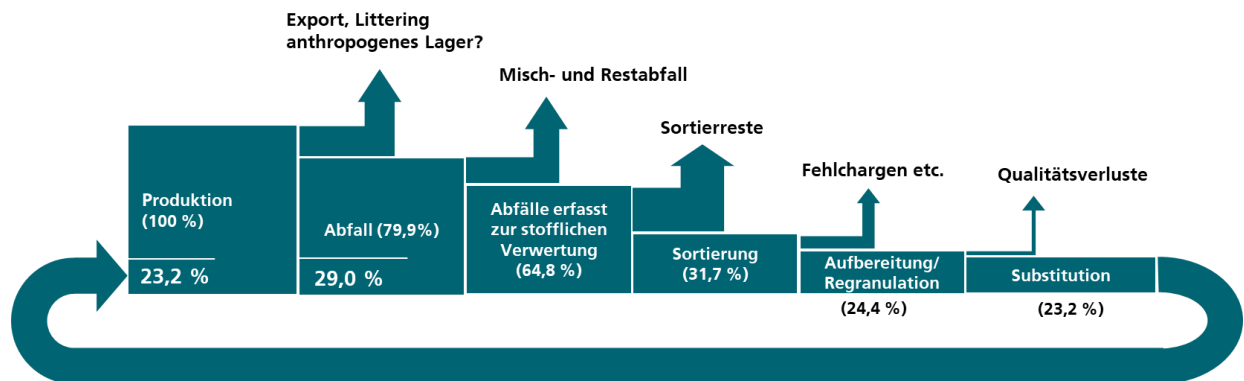


Bild 13: Kunststoffverluste entlang des Einwegkreislaufs. Die Werte in Klammern beziehen sich auf den Anteil der Produktion, der nach dem jeweiligen Schritt noch vorhanden ist. Die Werte unter dem Strich entsprechen dem Anteil an der Produktion bzw. der anfallenden Abfallmenge.

Legt man die typischen Energie- und Wasserverbräuche je Stufe auf den erzielten Output um, so beträgt der Endenergiebedarf 2,52 kWh und der Frischwasserbedarf von 0,68 L pro Kilogramm rezykliertes Endprodukt (Tabelle 5). Diese Betrachtung vernachlässigt, dass auch die Nebenströme verwertet werden (insbesondere energetisch), ist aber dennoch sinnvoll, da die stoffliche Verwertung das primäre Ziel der Kreislaufführung ist.

Tabelle 5: Inputbezogene Energie- und Wasserbedarfe je Prozessschritt sowie auf das Endprodukt bezogene Gesamtverbräuche und Zirkularität (zur Berechnung siehe Kap. 384.2)

Zielmaterial	Typischer Energiebedarf [kWh/kg]	typischer Wasserbedarf [L/kg]	Anteil von der Produktion, der die Stufe erreicht [%]
bezogen auf den Input in die Stufe			
Sortierung	0,07	0	64,8
Aufbereitung, inkl. Regranulation	0,75	0,5	31,7
Formgebung	1,30	0	23,2
bezogen auf den Output			
Gesamt	2,52	0,68	23,2

²¹ Dies trifft dann zu, wenn man annimmt, dass die Verteilung der Bechermengen aus PE, PP, PS und PET in etwa der Verteilung im gesamten LVP-Strom entspricht

4.3.2 Generische Betrachtung zu getrennt gesammelten Kunststoffeinwegabfällen

Die getrennte Sammlung von Einwegverpackungen ist bspw. für Getränkeflaschen und auch im Gewerbe bspw. bei Agrarfolien oder Kanistern etabliert. Hier kann prinzipiell mit geringeren Verlusten bei Sammlung und Sortierung, geringeren Verunreinigungen und dementsprechend einem deutlich höheren Input in die Aufbereitung gerechnet werden. Während die **stoffliche Verwertungsquote** aus der LVP-Sortierung nur 49,3 % bezogen auf die eingehende Kunststoffmasse beträgt, erreicht sie bei **Einweggetränkeflaschen 88,1 %** und bei getrennt gesammelten Gewerbeabfällen 85 % (BKV 2024). Sachbilanzdaten aus der Ökobilanzstudie zur »Kreislaufflasche« wurden bisher nicht veröffentlicht, so dass eine Auswertung analog zur Analyse von LVP nicht möglich ist. Uekert et al. (2023) geben für das mechanische Recycling von PET-Flaschen Werte für den Energiebedarf von 0,43 kWh/kg und den Wasserbedarf von 1,00 L/kg bezogen auf den Output an. Die Effizienz der Abfallerfassung und der Zuführung zur stofflichen Verwertung wird in ihrer Studie nicht im Detail berichtet, für Kalifornien wird exemplarisch eine Erfassungsrate von nur 30 % angegeben. Die gesammelten Flaschen weisen mit 12 bis 14 % eine recht hohe Verschmutzung auf. Von den Autoren werden die Ausbeuten (»material retention«) ab der Sortierung für PET mit 57 bis 90 % angegeben.

Die Sammlung von Einweggetränkebechern, bspw. wenn es sich um PET-Becher handelt, über die Sammelsysteme für Einwegflaschen, könnte die Ausbeute deutlich erhöhen und die Verbrauchsdaten reduzieren. Bis heute gibt es Rückgabeautomaten aber nur für Mehrwegbecher (Utopia 2023).

4.3.3 Einwegbecher aus PP, PS und PET

Einwegbecher aus Kunststoff sind zumeist aus PP oder PS und im geringeren Maße aus PET. Im Weiteren werden daher die zuvor bestimmten typischen Werte für den Energie- und Wasserverbrauch verwendet.

Die Becher müssen am Lebensende korrekterweise über den LVP-Pfad dem Recycling zugeführt werden. Optimistisch könnte man daher annehmen, dass der nicht erfasste Anteil der Einwegbecher dem des Abfalls insgesamt entspricht. Da Einwegbecher aber vor allem im **To-go-Bereich** Anwendung finden, ist es allerdings wahrscheinlich, dass sie **überproportional über den Restabfallpfad** entsorgt und gar nicht ordnungsgemäß entsorgt (Littering) werden. Die tatsächliche **Ausbeute an Rezyklat** dürfte dementsprechend eher geringer sein. Eine aktuelle deutschlandweite Sortieranalyse von LVP-Sammlungen der Hochschule Pforzheim ergab einen Anteil von 6 % Bechern (Auer et al. 2025), davon allerdings nur ein geschätzter Wert von 1,2 % To-go-Einweggetränkebecher, die hauptsächlich (zu 77 %) aus Kunststoff bestanden (Schill 2025). Bei einer LVP-Sammelmenge von 2,51 Mt/a (siehe Kapitel 4.2) und einem geschätzten Gesamtaufkommen von 28 000 t/a an To-go-Einweggetränkebechern und davon wiederum 8400 t aus Kunststoff (siehe Kapitel 1.5.1) ergäbe sich eine erfasste Menge von etwa 1800 t Einweggetränkebechern in der LVP-Sammlung bzw. einer Erfassungsquote der KS-Becher von 16,5 %. Dies wäre in

der Tat deutlich niedriger als die oben angegebene durchschnittliche Erfassungsquote für Kunststoffverpackungen von 64,8 %. Weiterhin wird das PET aus der LVP-Sammlung, sofern es nicht in Form von Getränkeflaschen vorliegt, bis heute nicht rezykliert (Knappe et al. 2021). Becher aus rPET nutzen daher vor allem Material aus der Getrenntsammlung von Getränkeflaschen.

Darüber hinaus ist grundsätzlich anzumerken, dass die heute hergestellten Rezyklate aus dem LVP-Recycling **nicht für den Lebensmittelkontakt** verwendet werden. Einzige Ausnahme sind die aus dem LVP-Strom abgetrennten PET-Getränkeflaschen. Die über den LVP-Pfad entsorgten Einwegbecher können daher zwar in Sekundäranwendungen Primärrohstoffe ersetzen, von einem Closed-Loop-Recycling kann aber heute nicht gesprochen werden. Es ist davon auszugehen, dass die Verbrauchswerte für Energie und Wasser weiter und überproportional steigen, wenn die Materialien den Anforderungen für den Lebensmittelkontakt gerecht werden sollen. Im Folgenden wird daher **für Becher eine maximale und eine minimale Gesamtausbeute von 23,2 % und 0 %** angenommen. **Bezogen auf das Nennvolumen ergeben sich für Einwegbecher aus Kunststoff typische Werte gemäß nachfolgender Tabelle.**

Tabelle 6: Verbrauchswerte und Zirkularität bei der Kreislaufführung von Einwegbechern aus Kunststoff

Kriterium	Wert]
Frischwasserverbrauch [L/L]	0,023
Endenergiebedarf [kWh/L]	0,086
Zirkularität (Downcycling möglich)	23,2 %
Zirkularität (kein Recycling, wenn FCM erforderlich)	0 %

4.4 Kreislaufführung von Einwegverpackungen aus PPK

4.4.1 Generische Betrachtung – PPK

Der Grundstoff für die moderne Papierherstellung sind **Holzfasern**, die entweder mechanisch (Holzschliff, Hackschnitzel) oder chemisch (Zellstoff) gewonnen werden. Holz weist die typischen Vor- und Nachteile nachwachsender Rohstoffe auf. Zum einen ist das Material in Bezug auf Kohlendioxid neutral (CO₂-neutral), da CO₂-Aufnahme beim Wachsen und CO₂-Abgabe bei der Verbrennung/Kompostierung gleich sind. Zudem kann die Papierindustrie die bei der Papierherstellung anfallenden biogenen Abfallmengen zur Gewinnung von Prozesswärme und Strom für die Papierherstellung verwenden und so sehr CO₂-arm produzieren. Allerdings bewirkt der hohe Holzverbrauch auch einen erheblichen ökologischen Druck auf die Ressource »Wald«, eine ökologisch relevante Wirkung, die in dieser Studie nicht weiter betrachtet wird.

Das Recycling von Papier ist seit Jahrzehnten etabliert und findet integriert im Produktionsprozess statt. Bild 14 zeigt eine Übersicht des Papierherstellungsprozesses mit den benötigten Primär- und Sekundärrohstoffen und anfallenden

Reststoffen. Für Sekundärrohstoffe aus PPK existieren zwei Hauptpfade der Gewinnung: Entweder wird **PPK aus der LVP-Fraktion** der gelben Tonne gewonnen oder es wird im blauen System **der getrennten Altpapiersammlung** erfasst. Kunststoffbeschichtete PPK-Lebensmittelverpackungen (Salat-Bowls, Coffee-to-go-Becher, Backpapier, Luftpolsterumschläge etc.) sind kunststoffbeschichtet und müssen über den LVP-Pfad (gelbe Tonne) verwertet werden. Stark verschmutzte PPK-Verpackungen (z. B. Pizzakartons) sind hingegen im Restmüll zu entsorgen, sie werden keinem Recycling zugeführt. Bei dem LVP-Weg handelt es sich um eine positive Sortierung (PPK wird aus dem Strom herausgeholt); bei dem Weg über das blaue System um eine negative Sortierung (Störstoffe werden entfernt).

Das eingesetzte Altpapier setzt sich wie in Bild 14 erkennbar ist aus **verschiedenen Fraktionen** zusammen. In der Hauptsache ist es vorsortiertes Altpapier, welches von vorgelagerten Sortieranlagen sortiert wird. Einige auf Verpackungspapiere spezialisierte Papiermühlen nehmen allerdings auch unsortiertes Altpapier und, je nach Marktpreis, PPK minderer Qualität aus der LVP-Sortierung an, welches in LVP-Sortieranlagen über NIR-Trenner abgetrennt wurde. Einige spezialisierte Anlagen mit langen Suspensionszeiten können auch Flüssigkartons (FKN) und kunststoffbeschichtete Becher aus LVP verarbeiten.

In Sortieranlagen wird PPK aus der blauen Sammlung zunächst vereinzelt und nach Größen sortiert. Auch Störstoffe werden aussortiert und der Feinstfraktion zugeordnet, die getrennt verwertet oder entsorgt werden muss. Dann werden Pappen und Kartonagen über Spike-Anlagen von grafischen Papieren getrennt. Spike-Anlagen²² trennen Pappe und Papier nach ihrer Steifheit: Pappe wird von einer Dornenwalze aufgespießt und so aus dem Strom nach oben abgehoben, wohingegen das Papier nach unten fällt. Die Fraktionen werden als **Ballenware** in Gruppen gemäß DIN EN 643 an Papiermühlen weitergegeben.

In der Papiermühle wird das Papier dann befeuchtet, um den Faserverbund aufzutrennen (**»Suspensionsprozess«**). Hierfür werden Trogauflöser oder Auflösetrommeln verwendet. Fremdbestandteile (**»Rejekt«**), bestehend aus Kunststofffolien, Textilien, Drähten oder Schwermetallen werden aus dem Papierverbund gelöst und abgeschieden. In der Regel sind mehrstufige Reinigungsverfahren erforderlich, um die nötige Reinheit zu erreichen. Bedruckte Altpapiere müssen zuvor einem **Deinking-Prozess** zugeführt werden, um die Fasern von Druckfarben zu reinigen und aufzuhellen. Bei Pappen ist in der Regel keine Entfärbung (Deinking) nötig. Zu dem erzeugten Faserbrei (**»Pulp«**) werden Frischfasern hinzugegeben und die Fasern in einer dünnen Schicht auf einem Sieb abgeschöpft, entwässert und schließlich getrocknet, sodass neue PPK-Materialien erhalten werden (Grummt und Fabian 2023). In der Regel liegt der Frischwasserbedarf für die PPK-Produktion aus Frischfasern bei etwa 40 L/kg und damit etwa viermal so hoch wie bei der Produktion aus Recyclingfasern, die unter 10 L/kg benötigen. Der Energiebedarf ist bei Frischfasern hingegen mit unter 1 kWh/kg etwas geringer als bei Recyclingfasern mit ca. 1,25 kWh/kg (FEFCO 2024).

²² z.B. Grumbach und Petermann: <https://www.gupgmbh.de/en/paperspike/> (abgerufen am 22.09.2025)

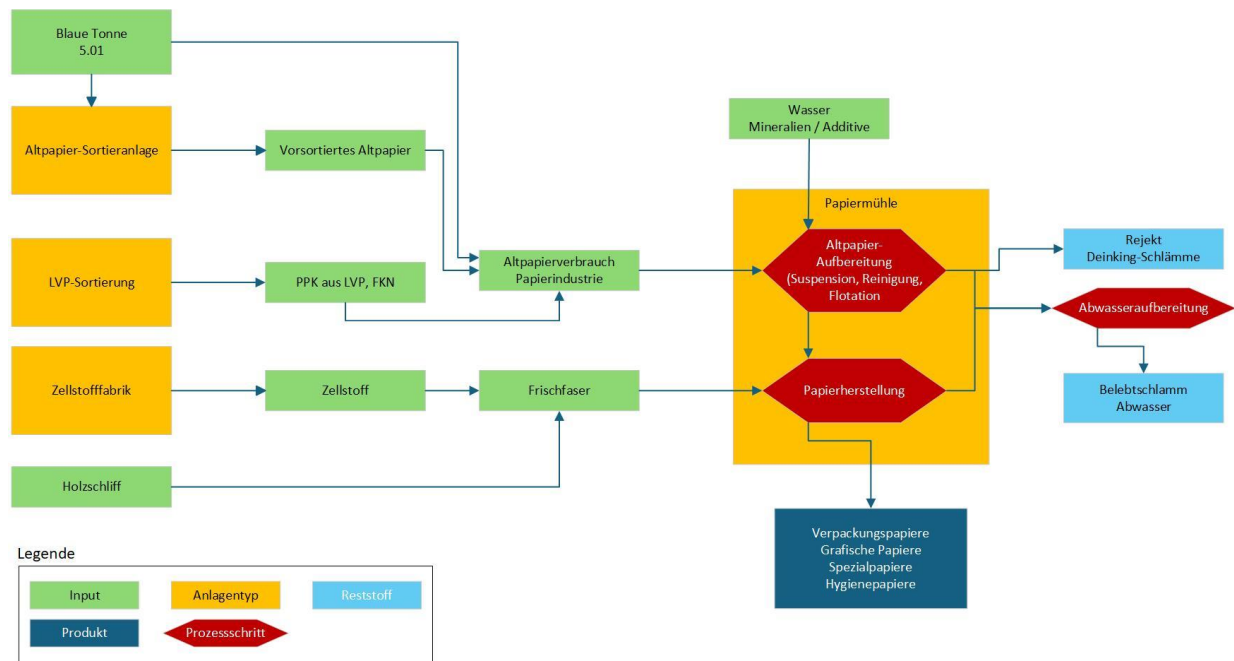


Bild 14: Übersicht über den Herstellungsprozess von Papier und den Einsatz von PPK und Frischfasern [Eigene Darstellung nach (Grummt 2022; LUBW 2020)]

Die Papierindustrie setzt als Faserstoff hauptsächlich Altpapier ein; die **Altpapiereinsatzquote** lag im Jahre 2023 bei **83,1 %**, sie beschreibt den Altpapier-einsatz bezogen auf die gesamte PPK-Produktion, aber nicht den Anteil an Sekundärfasern von der Gesamtfasermenge. Die restlichen 16,9 % der eingesetzten Fasern sind Frischfasern, hauptsächlich bestehend aus Zellstoff und zu einem geringen Anteil, bspw. bei der Herstellung von Zeitungen, auch Holzschliff (Umweltbundesamt (Hg.) 2024).

Das European Paper Recycling Council berichtet in einem Monitoringbericht für 2023 eine Altpapiereinsatzquote von 79,3 %, für innereuropäisch verwertete Abfälle reduzierte sich diese Quote auf 67,1 % (EPRC 2024). Es wird nicht aufgeschlüsselt, wie hoch die aus den integrierten Produktionsprozessen ausgeschiedenen Verlustmengen des Altpapiers und die Menge der eingesetzten Pre-Consumer-Rezyklate sind; beide Anteile verringern die Zirkularität.

Eine Auswertung von internationalen Daten der CEPI (2025) für die 18 Mitgliedsländer ergibt eine Erfassungsquote für Papierabfälle zum Recycling, bereinigt um Export und Importmenge, bezogen auf die konsumierte PPK-Menge von 68 %. Im Weiteren gibt CEPI (2025) in seinen Daten für die Transformation von Altpapier zu verwertbarem Faserstoff (»Pulp«) eine Verwertungsquote von 73,3 % an. Es wird nicht weiter erläutert, worauf diese Transformationsverluste zurückzuführen sind. Es ergibt sich insgesamt eine Recyclingfasereinsatzquote von 49 % (ohne Berücksichtigung nicht faserförmiger Papierbestandteile).

Bild 15 zeigt den **Stoffkreislauf PPK**. Insbesondere ist hier zu erkennen, dass es **verschiedene Altpapierquoten** gibt und in der Literatur oft nicht klar wird, auf welche dieser Quoten Bezug genommen wird. Die Altpapierrücklaufquote (Altpapieraufkommen/Papierverbrauch) beträgt 85,1 %, d.h. 14,9 % des

genutzten Papiers geht während der Nutzungsphase verloren. Diese Verluste liegen nicht in der unmittelbaren Verantwortung der Papierindustrie, aber um die Zirkularität vergleichen zu können, muss dies mitberücksichtigt werden, wie es auch bei Mehrweg über die Rücklaufquote gemacht wird.

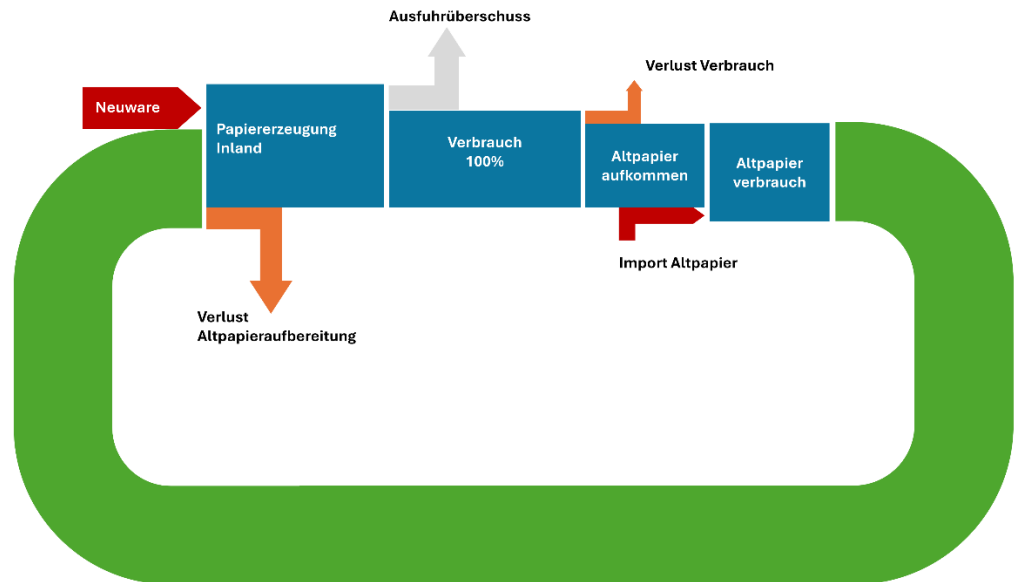


Bild 15: Wertstoffkreislauf PPK in Deutschland (nach (Umweltbundesamt (Hg.) 2024) und eigene Berechnungen)

Grundsätzlich wird das Recycling von Papier durch den Abbau der Fasern während des Herstellungs- bzw. Recyclingprozesses begrenzt, so dass typischerweise **5–7 Umläufe erreicht** werden, wobei sich die Qualität von Umlauf zu Umlauf verschlechtert. Durch die permanente Zugabe von Frischfasern wird dem entgegengewirkt und eine konstante Qualität erreicht. Bei der Herstellung von neuem Papier aus Altpapier fallen Verluste von 10 % (Verpackungspapier) bis 20 % (Zeitungspapier) an, da ein bestimmter Anteil der recycelten Fasern zu stark verkürzt ist und ausgeschleust werden muss (Höke 2013). Diese Verluste sind dementsprechend nicht durch Verfahrensoptimierung zu reduzieren, sondern immanent im Werkstoff begründet.

Die Zirkularität ist nicht eindeutig zu bestimmen, da – anders als bei Kunststoff – kein Rezyklat hergestellt wird, sondern in einem Schritt direkt PPK aus Altpapier und Frischfasern hergestellt wird. Zudem ist der innerdeutsche Kreislauf durch Im- und Exporte von Papier und Altpapier nicht vollständig geschlossen. Unter der Annahme, dass sich diese Stoffe nicht von den innerdeutschen unterscheiden und einer mittleren Verlustquote von 15 % kann man berechnen, dass von dem in Deutschland verbrauchten Papier ein Anteil von

$$\varepsilon_{ges} = \varepsilon_{Erfassung} \times (1 - \varepsilon_{Verlust}) = 0,85 \times (1 - 0,15) \approx 0,72 = 72 \% \quad (5)$$

wieder zu Papier verarbeitet wird.

Für Pappe gibt FEFCO für **2023 eine durchschnittliche Altpapiereinsatzquote von 88 % in Europa** an (FEFCO 2024). Der Datensatz Corrugated

board 2021 in der MLC-Datenbank (Sphera 2025) geht von einem geringeren Wert von 83 % aus. **Wird Pre-Consumer-Reycling ausgeschlossen, reduziert sich die Altpapiereinsatzquote auf 77 %** (FEFCO 2024).

Für Pappkartons wie Obst- und Gemüseboxen, die eine sehr große Festigkeit und Stapelbarkeit erreichen müssen, werden üblicherweise Papiersorten mit sehr geringem Altpapieranteil verwendet (Semichemical Fluting und Kraftliner). Deshalb kann hier die Verwendung der durchschnittlichen (hohen) Recyclingquote zu einer deutlich zu positiven Bewertung führen (vgl. diesbezüglich auch die LCA von Castellani et al. (2022)). Demgegenüber werden die Sorten Wellenliner und Testliner nahezu ausschließlich aus Altpapier hergestellt. Der Altpapiereinsatz beträgt 1,09 Tonnen pro Tonne Produkt, ist also größer als 100 %, da ein Anteil der Fasern während des Prozesses qualitätsbedingt ausgeschleust werden muss (FEFCO 2018, 2024). Für das Jahr 2023 gibt FEFCO Daten gemäß Tabelle 7 für verschiedene Pappetypen an. Dabei reduzieren sich die Rezyklateinsatzquoten, wenn seitens FEFCO typenspezifisch berichtete Pre-Consumer-Rezyklate herausgerechnet werden. Es kann weiterhin davon ausgegangen werden, dass sich von der Altpapiereinsatzmenge ein Teil im Rejekt befindet. Dies reduziert die effektive Wiedereinsatzquote weiter.²³

In Bezug auf die erreichbare **Zirkularität** muss auch berücksichtigt werden, dass die Anforderungen an den Lebensmittelkontakt den Einsatz von Rezyklaten deutlich beschränken. Gemäß der BfR-Empfehlungen müssen verschiedene Grenzwerte eingehalten werden, die vor allem für Rezyklate auf Basis von Altpapier, das bedruckt ist, schwer einzuhalten sind. Bereits seit 2017 wird deshalb über eine Barrierepflicht für Lebensmittelkontaktmaterialien auf Basis von PPK diskutiert (BMEL 2017; Bundesinstitut für Risikobewertung 2023). Entsprechende Barrieren sind beim Einsatz von Recyclingfasern inzwischen auch ohne Umsetzung des Regulierungsvorhabens üblich (WestRock 2025; MM Group 2025). Diese Barriere könnte die Recyclingfähigkeit deutlich einschränken. Allerdings gibt es weder über den Altpapieranteil in Lebensmittelkontaktmaterialien noch über die korrekte Entsorgung von PPK-Verpackungen mit Barrierschichten (gelbes oder blaues System) systematische Untersuchungen noch findet eine explizite Kennzeichnung der Verpackungen diesbezüglich statt.

²³ Von FEFCO (2024) werden weiterhin Makrobilanzen des Einsatzes von Primär- und Rezyklatfasern für die einzelnen Pappsorten angegeben. Diese unterscheiden sich von den Inventardaten, bei Kraftliner liegen sie sogar noch niedriger als die in Tabelle 7 korrigierten Werte.

Tabelle 7: Frischwasserbedarf und Energieverbrauch bei der Herstellung verschiedener Pappetypen sowie erreichte Rezyklateinsatzquote, Daten aus FEFCO (2024), ergänzt durch eigene Abschätzungen auf Basis von Daten zu Pre-Consumer-Rezyklaten und Rejekten

Kriterium	Semi-chemical Fluting	Kraftliner	Recycle Fluting	Testliner
Marktanteile	2,4 %	15,5 %	36,1 %	45,9 %
Frischwasserbedarf [L/kg]	38,16	31,41	8,13	8,13
Endenergiebedarf [kWh/kg Output]	1,10	0,99	1,24	1,24
Rezyklateinsatzquote	14,4 %	25,3 %	109 %	109 %
_abzüglich Pre-Consumer-Rezyklate (eigene Abschätzung)	12,5 %	23,2 %	100,8 %	100,8 %
_abzüglich der Rejekte (eigene Abschätzung)	11,7 %	22,4 %	99,5 %	99,5 %

In Tabelle 7 sind auch die Verbrauchswerte für Endenergie und Frischwasser angegeben. Aus einer linearen Extrapolation (auf 100 % Rezyklateinsatz, vgl. Kapitel 9 Anhang C) lassen sich **für das Recycling von Altpapier zur Papp-Produktion ein typischer Energiebedarf von 1,24 kWh/kg und ein Frischwasserbedarf von ca. 7,8 L/kg** bezogen auf Output abschätzen. Die Papierindustrie (2025) in Deutschland gibt sowohl für den spezifischen Wasserverbrauch (hier als Abwasser) und auch den Energiebedarf etwas höhere Werte an 8,9 L/kg bzw. 2,7 kWh/kg an. Da es sich hier um Gesamtbilanzen der Industrie handelt, sind allerdings die Systemgrenzen nicht eindeutig.

Im Folgenden wird die Situation für Einweg-Pappbecher und Kartons im Detail betrachtet.

4.4.2 Einwegbecher aus PPK

Einwegbecher aus PPK, in der Regel mit PLA oder PE beschichtet, sind durch die Endverbraucher bevorzugt im **gelben Sack** zu entsorgen. In LVP-Sortieranlagen werden sie dann der Fraktion »PPK aus LVP« zugeordnet. Diese Fraktion ist aufgrund von Verunreinigungen von minderer Qualität für das Recycling. Die Wahrscheinlichkeit, dass diese Fraktion einem Recycling zugeführt wird, hängt daher von der jeweils aktuellen Marktsituation ab (Kölmel 19.12.2024). Weiterhin dürfen Papierfabriken, die Primär- oder auch Sekundärverpackungen für **Lebensmittel** produzieren, gemäß einer Empfehlung des Bundesinstitut für Risikobewertung (2023) **kein PPK aus der Mehrkomponenten-Erfassung** und somit auch nicht aus dem LVP-Sammlung verwenden. Es kommt bei dieser Art von Verpackung allerdings vielfach zu **Fehlwürfen**, bei denen Verbraucher die **Becher im Altpapier** entsorgen, so dass es zumindest bei Papierfabriken, die diese Verpackungen nicht aussortieren, da sie über einen Trogsuspenser verfügen, zu einem Recycling im geringen Maßstab kommen kann. In einer Untersuchung von Grummt und Fabian (2023) gaben 11 von 45 Papiermühlen an, Togo-Becher aus dem Strom auszusortieren.

Darüber hinaus werden aber Einweg-Becher aus To-go-Anwendungen oft im Restmüll entsorgt, da im öffentlichen Bereich zumeist keine getrennte Müllsammmlung angeboten wird; sie sind dann für das Recycling vollständig verloren. Umwelfreundliche To-go-Anwendungen erleichtern darüber hinaus das Littering, allerdings gibt es hierzu keine quantitativen Erkenntnisse. Einzelne Hersteller bieten für Einwegpappbecher eine Rücknahme (restentleert, gestapelt, im Karton) an (Papstar 2025b). Inwieweit solche Angebote angenommen werden, ist nicht bekannt.

Die Wahrscheinlichkeit, dass PPK aus LVP einer hochwertigen Verwertung zugeführt wird, geben Grummt und Fabian (2023) für Deutschland mit 25,5 bis 66,8 % an. Die Spreizung wird mit der Unsicherheit erklärt, die aus der Schließung einer wichtigen deutschen Papierfabrik (Delkeskamp) resultiert. Grundsätzlich gehen die Autoren von einer stark verschmutzten, wenig lagerfähigen und zur Schimmelbildung neigenden Fraktion aus, für die keine hochwertige Verwertung möglich ist. Darüber hinaus betonen sie nochmals, dass Papierfabriken, welche die PPK-Fraktion aus der LVP-Sammlung verwerten, gemäß der BfR-Empfehlung keine Produkte für den Lebensmittelkontakt herstellen dürfen. Inwieweit diese Durchschnittswerte für sämtliche PPK-Verpackungen und damit auch für PPK-Einwegbecher gelten, ist unbekannt.

Potting und van der Harst (2015) führten eine internationale Metaanalyse zu Ökobilanzstudien für Ein- und Mehrwegbecher durch. In sämtlichen Ökobilanzen wurde für die EoL-Behandlung von beschichteten Pappbechern Verbrennung oder Deponierung angenommen. **In einer weiteren Metaanalyse von Lewis et al. (2021) wird hervorgehoben, dass Pappbecher dann vorteilhaft abschneiden, wenn in Szenarien Recyclingquoten von 80 % oder mehr angenommen werden; diese Szenarien entsprechen offensichtlich aber nicht der Praxis.** Joana Almeida et al. (2018) nehmen für PE-beschichtete Pappbecher für Europa eine Recyclingquote von 21 % an, Fotinidis (2020) geben für die gleichen Becher für Großbritannien eine Recyclingquote von nur 0,25 % bezogen auf den Verbrauch an. Lewis et al. (2021) heben in einer Metaanalyse hervor, dass keine der untersuchten Studien das Littering als typische – wenn auch ungewünschte – EoL-Option untersucht.

Zwei Unternehmen geben für eine typische Pappqualität für Becher und andere Take-Away-Foodbehälter an, dass sie aus Frischfasern hergestellt werden und mit Polyethylen beschichtet sind (Stora Enso 2025; Huhtamäki 2025). Pladerer et al. (2008b) nehmen ebenfalls an, dass die Becher aus Frischfasern hergestellt werden und vollständig thermisch verwertet werden. Einige Hersteller bieten PPK-Becher an, die vollständig aus PPK bestehen und somit der Getrennsammlung zugeführt werden könnten (CupPrint 2025; Papstar 2025a). Inwieweit dies von den Konsumenten erkannt und in Bezug auf den korrekten Entsorgungsweg verstanden wird, ist unbekannt. Gleichzeitig handelt es sich aber auch hier um keinen geschlossenen Kreislauf, da bei dem Recycling zumindest nicht auf die Herstellung neuer Becher abgezielt wird (Papstar 2025a, 2025b). Einzelne Hersteller bewerben doppelwandige Produkte, die in der äußeren Schicht Rezyklate aufweisen, ohne dass diese exakt in Bezug auf Herkunft und Mengenanteil spezifiziert würden (CupPrint 2025).

Sämtliche obigen Werte berücksichtigen nicht die oben beschriebenen Verluste während der Nutzungsphase sowie die Verluste aufgrund einer Abnahme der Faserqualität. Werden diese berücksichtigt und gleichzeitig angenommen, dass Verluste via Littering oder Entsorgung über den Restmüllpfad 50 % betragen²⁴, so ergäbe sich unter der Annahme einer mittleren Sortier- und Aufbereitungsausbeute aus den Werten von Grummt und Fabian (2023) als **realistischer Wert für die Zirkularität 17 %**. Die **minimale Zirkularität läge bei 0 %**, wenn aufgrund der Anforderungen für den Lebensmittelkontakt ausschließlich Frischfasern verwendet werden.

Spezifische Werte für Energie- und Frischwasserverbrauch beim Recycling wurden in der Literatur selten berichtet, stattdessen werden in der Regel aggregierte Ökobilanz-Datensätze verwendet. Szenarien zur Relevanz des Wasser- und Energieverbrauchs in vergleichenden Ökobilanzen bezogen sich auf Variationen beim Mehrwegsystem (Ligthart 2007; Martin et al. 2018). Der Aufwand für die Becherherstellung ausgehend von Pappe wurde nicht berücksichtigt, weiterhin bestehen Unsicherheiten hinsichtlich des korrekten Pappetyps für die Becherherstellung (Ligthart 2007). Cottafava et al. (2021) berichten für die Becherproduktion ausgehend von Pappe einen Wert von 1,3 kWh/kg. Ligthart (2007) nimmt Schnittverluste von 21 % an, Cottafava et al. (2021) von 8 %, Martin et al. (2018) vernachlässigen diese.

Da die Becher vorwiegend aus Frischfasern hergestellt werden, ist es schwierig, sinnvolle Verbrauchswerte und Zirkularitäten anzugeben. Vereinfachend wird für die Becherproduktion für den **Frischwasserbedarf** der in Kapitel 4.4.1 abgeleitete Wert **von 7,8 L/kg** verwendet; für Endenergie der entsprechende Wert zuzüglich des Energieaufwandes für die Produktion nach Cottafava et al. (2021), so dass sich **2,55 kWh/kg** ergeben. Beide Werte wurden unter der Annahme von Schnittverlusten von 15 % und unter Nutzung des Umrechnungsfaktors aus Kapitel 4.2.2 auf das Nutzvolumen umgelegt, die Werte finden sich in Tabelle 8.

Tabelle 8: Verbrauchswerte und Zirkularität bei der Kreislaufführung von Einwegbechern aus PPK

Größe	Wert
Frischwasserverbrauch [L/L]	0,27
Endenergiebedarf [kWh/L]	0,101
Zirkularität max. (inkl. Downcycling)	17 %
Zirkularität min. (Anforderung Lebensmittelkontakt als Ergebnis des Recyclings)	0 %

²⁴ Die Analyse von Schill 2025 zeigte nur wenig Einweg-Pappbecher im LVP-Abfall. Üblicherweise wird etwa ein Viertel bis ein Drittel des PPK-Verpackungsabfalls getrennt gesammelt (blaues System). Eine Abschätzung von 50 % Verlusten ist daher unsicher, gleichwohl konservativ.

4.4.3 Einwegboxen aus PPK

Für einen typischen (durchschnittlichen) Karton aus Wellpappe hat FEFCO (2024) aus den in Tabelle 7 aufgeführten Papptypen anhand der Marktanteile den Energiebedarf und den Frischwasserverbrauch bestimmt. Die Kombination der Pappen und die Herstellung des Kartons inklusive der damit verbundenen Materialverluste sind dabei berücksichtigt. Der Frischwasserbedarf berücksichtigt auch die Frischfaserproduktion, daher wurden zur Berechnung des durch das Recycling verursachten Frischwasserbedarfs die in Kapitel 4.4.1 extrapolierten Werte zugrunde gelegt. Für den **Endenergiebedarf** wird der von FEFCO angegebene Wert von **2,1 kWh/kg** verwendet, da er zusätzlich die Produktion der Verbundpappe und des Kartons berücksichtigt. Da die im FEFCO-Datensatz enthalten – geringen – Frischfaseranteile den Energiebedarf eher reduzieren, ist diese Abschätzung konservativ. Für die Umrechnung auf das Nutzvolumen wurden die Umrechnungsfaktoren aus Kapitel 4.2.2 verwendet.

Für den Anteil an Altpapierfasern im fertigen Karton ergibt sich unter Abzug von Pre-Consumerabfällen und des vom Altpapier verursachten Rejekts eine **Recyclingfaseranteil von 82,8 %**. Dieser hohe Wert ist nur darstellbar, wenn Altpapieranteile aus anderen Anwendungen eingesetzt werden. Weiterhin kann nicht aufgeschlüsselt werden, ob es sich um echte Zirkularität in dem Sinne handelt, dass die Rezyklate identische Anteile der verschiedenen Papiertypen wie das Primärprodukt enthalten. Es ist eher wahrscheinlicher, dass minderwertige Faserqualitäten, bspw. Wellenstoff und Testliner, bevorzugt ausgeschleust werden, sodass es sich um eine Kaskadennutzung handelt (Die Papierindustrie 2025). Aus Daten der CEPI (2025) lassen sich für verschiedenen Verpackungstypen bspw. Altpapieranteile aus Pappe und Karton von ca. 35 bis 80 % bezogen auf die eingesetzte Altpapiermenge abschätzen.

Castellani et al. (2022) untersuchen in einer Ökobilanz die Herstellung eines Kartons für Obst und Gemüse, der aus 53 % Kraftliner und 47 % Semichemical Fluting besteht. Mit den obigen Werten für den Rezyklatanteil ergibt sich für die O+G-Box ein effektiver Rezyklatanteil (abzüglich Pre-Consumer-Rezyklate und Rejekt) von ca. 17,0 %. Direkte Energie- und Wasserverbräuche schlüsseln sie nicht auf. Für die Herstellung einer O+G-Box nahmen Levi et al. (2011) in einer älteren Studie für Italien eine ähnliche Zusammensetzung an (60% Kraftliner, 40 % Semichemical Fluting). Auch sie geben keine detaillierten Werte zu Energie- und Frischwasserverbrauch an, nur für die Produktion der Box aus Pappe wird ein niedriger Wert von 0,025 kWh berichtet (der darüber hinaus deutlich mit dem von Cottafova et al. (2021) berichteten Wert für die Produktion von Bechern (1,3 kg/kWh) kontrastiert).

Rasines et al. (2024) bestimmen einen Circularity Index (CI), der neben dem Rezyklatanteil auch den Energiebedarf für das Recycling im Vergleich zur Primärproduktion berücksichtigt. In der Tendenz kommen die Autoren ebenfalls zu dem Schluss, dass die Zirkularität niedrig ist.

Tabelle 9 zeigt die ermittelten Verbrauchswerte und Zirkularität von Einwegboxen aus PPK, wobei der Frischwasserverbrauch für Kraftliner (Tabelle 7) sowie

der von FEFCO angegebene Endenergiebedarf von 2,1 kWh/kg auf das verpackte Volumen umgelegt sind.

Tabelle 9: Verbrauchswerte und Zirkularität bei der Kreislaufführung von Einwegboxen aus PPK

Kriterium	Wert
Frischwasserverbrauch [L/L]	0,15
Endenergiebedarf [kWh/L]	0,040
Zirkularität max. (FEFCO 2024)	82,8 %
Zirkularität typ. bei höheren mechanischen Anforderungen (Castellani et al. 2022)	17,1 %
Zirkularität min bei mangelnder Recyclingfähigkeit durch Kunststoffanteile oder aufgrund der Überschreitung von Grenzwerten für den Lebensmittelkontakt	0 %

4.5 Kreislaufführung im Mehrwegkreislauf

4.5.1 Generische Betrachtung des Mehrwegkreislaufes

Mehrwegsysteme werden über **verschiedene Wege einer Reinigung zugeführt**. Es gibt Pool-Dienstleister, die die Verpackungen zur Verfügung stellen und die professionelle Reinigung übernehmen. Es gibt Unternehmen, die die verunreinigten Verpackungen direkt von den Kunden zurücknehmen und reinigen und auch Fälle, in denen der Kunde die Verpackung besitzt und reinigt. In vielen Fällen ist eine Reinigung nicht nach jeder Nutzung notwendig (bspw. bei Obst- und Gemüse-Kisten). In anderen Fällen kann auch eine Mehrfachreinigung bspw. im To-go-Bereich durch Kunden und Gastronomen vorkommen. Verlässliche Zahlen zur Reinigungshäufigkeit je Nutzung liegen nicht vor.²⁵

Je nach **Spülsystem (zentral vs. dezentral)** werden **verschiedene Spülmaschinen** bzw. -anlagen zur Reinigung von Mehrwegverpackungen verwendet. Tabelle 10 gibt eine Übersicht über die Maschinentypen, ihre Einsatzgebiete und das verwendete Reinigungsverfahren.

²⁵ Auch Einwegverpackungen werden gelegentlich gespült. Ob und wann bspw. LVP-Verpackungen gespült werden sollten, ist daher Gegenstand fortwährender Verbraucheraufklärung.

Tabelle 10: Übersicht der eingesetzten Maschinentypen für Mehrwegverpackungen und deren Anwendungsbereich

Maschinentyp	Spülgut	Einsatzort	Verfahren	Dauer des Spülgangs [min]	Temperatur [°C]	Reinigungsmittel, Hilfsstoffe
Durchlaufreinigungsanlage	Transportboxen, technische Teile	Industrie, Spülzentren	Chemisch-thermisch, Oberflächenbearbeitung durch Wasserdruck, kontinuierliche Befüllung durch Rollenbahn oder ähnliches	< 10	von kalt bis 80	Alkalischer Reiniger, Kein Entschäumer
Bandspülmaschine	Homogenes Spülgut, Besteck, Teller, Becher, ...	Spülzentren	Chemisch-thermisch (thermische Desinfektion), kontinuierliche Befüllung auf Band	< 10	Bis 85	Alkalischer Reiniger, Klarspüler (säurehaltig), ggf. Entschäumer und Trocknungshilfen
Tunnel- bzw. Korbspülmaschine	Heterogenes Spülgut, Becher, Boxen, Schalen	Spülzentren	Chemisch-thermisch (thermische Desinfektion), kontinuierliche Befüllung in Körben oder Racks	< 10	Bis 85	Alkalischer Reiniger, Klarspüler (säurehaltig), ggf. Entschäumer und Trocknungshilfen
Haubenspülmaschine	Heterogenes Spülgut, Becher, Boxen, Schalen	Dezentral in Gastronomie, Kantinen	Chemisch-thermisch (thermische Desinfektion), chargenweise Befüllung	< 10	Bis 85	Alkalischer Reiniger, Klarspüler, ggf. Enthärter
Untertischspüler	Heterogenes Spülgut, Becher, Boxen, Schalen	Dezentral in kleinen Gastronomiebetrieben, Cafés	Chemisch-thermisch (thermische Desinfektion)	< 10	Bis 85	Alkalischer Reiniger, Klarspüler, ggf. Enthärter
Haushaltsgeschirrspüler	Haushaltsgeschirr inklusive Mehrwegverpackungen (BYO-Systeme)	Dezentral beim Endverbraucher	Chemisch-thermisch oder enzymatisch (bei niedrigen Temperaturen), chargenweise Befüllung	60-180	Bis 70	Alkalischer oder enzymatischer Reiniger (für niedrige Temperaturen), Klarspüler

Durchlaufreinigungsanlagen sind spezielle, auf eine spezifische Form des Spülguts optimierte Bandanlagen, meist mit mehreren Linien, die im industriellen Kontext eingesetzt werden. Sie dienen dem Erreichen einer technischen Sauberkeit, also bspw. dem Entfernen von Öl und Staub, können aber auch für Boxen für Nahrungsmittel eingesetzt werden, bspw. für Obst und Gemüse. Die Anlagen sind zumeist mehrstufig. Einer Vorwäsche zum Einweichen von Etiketten und Entfernen von Proteinen schließen sich Hauptwäsche und Klarspülung an. Das Spülgut wird häufig automatisiert direkt von Transportpaletten zugeführt, ausgerichtet und bei klappbaren Verpackungen auseinandergeklappt. Bei großen Anlagen sind Schleudertrockner üblich, die bei hohen Drehzahlen die Oberflächenfeuchte sehr energieeffizient reduzieren.

Herstellerseitig standardisierte Band- und **Korbspülmaschinen** haben einen modularen Aufbau, der die folgenden Elemente umfasst: Maschineneinlauf, Vor- und Hauptwaschzone, Klarspülzone, Trockenzone und Maschinenauslauf

bzw. Auslauftisch. Bei Anlagen mit hohem Automatisierungsgrad sind weitere Schritte vor- und nachgeschaltet wie die Depalettierung, Entstapelung und Sortierung vor der Reinigung und ggf. Qualitätskontrolle über automatische Sensorik anstelle von Sichtkontrolle. Während **Bandspüler** üblicherweise für homogenes Spülgut geeignet sind und teilweise auf einzelne Spezialverpackungen spezialisiert sind (z.B. Becher mit Fingerband oder extra flache Anlagen für Besteck), sind Tunnel- bzw. Korbspülmaschinen flexibler und können heterogenes Spülgut gemeinsam spülen. Bild 16 zeigt die systematische Darstellung einer handelsüblichen Bandspülmaschine der Firma MEIKO mit den oben beschriebenen fünf Zonen.

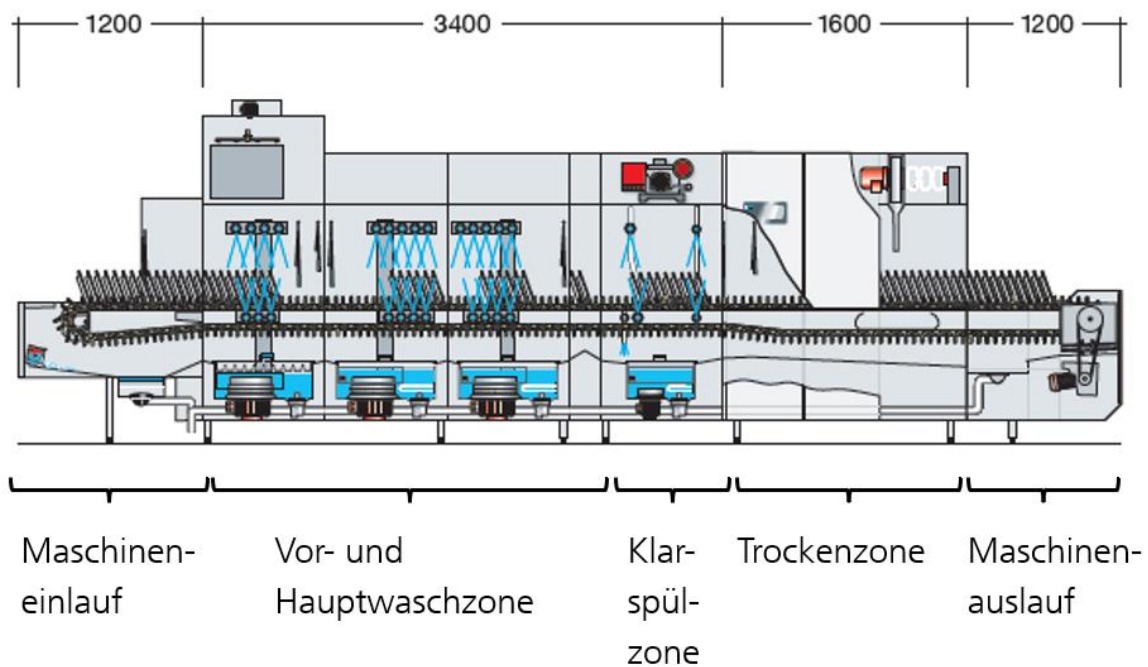


Bild 16: Bandspülmaschine mittlerer Größe zum Einsatz in Spülzentren (Modell MiQ-L von MEIKO)

Durch den modularen Aufbau können mehrere Elemente der Vor- und Hauptwaschzone variabel hintereinandergeschaltet werden, um eine höhere Verweilzeit und bessere Reinigung zu erzielen bzw. die Bandgeschwindigkeit und den Durchsatz zu erhöhen. Zudem kann die Anlage auf Art und Material des Spülgutes ausgerichtet werden. Beispielsweise sind manche Anlagen speziell auf Spülgut aus Kunststoff ausgelegt. Da **Kunststoff aufgrund seiner niedrigen Wärmekapazität**²⁶ deutlich schwerer zu trocknen ist, verfügen diese Anlagen über **Trockenzonen** mit Vibrationssystemen und nachgeschalteten Kühleinheiten, um einer Kondensation an der sauberen Verpackung zu vermeiden und Schimmel vorzubeugen.

Hauben- und Untertischspülmaschinen werden chargenweise befüllt und für die dezentrale Reinigung, bspw. in der Gastronomie, eingesetzt. Bild 17 zeigt

²⁶ Die niedrige Wärmekapazität führt dazu, dass das Spülgut nach dem Ende des Spülvorgangs schnell abkühlt und die im Spülgut gespeicherte Wärme nicht zum Nachtrocknen ausreicht. Der Effekt ist auch bei Haushaltsgeschirrspülern zu beobachten.

eine Haubenspülmaschine für große Durchschubhöhen, die speziell für sperriges Spülgut wie Boxen geeignet ist.



Bild 17: Haubenspülmaschine zur dezentralen Anwendung bspw. in der Gastronomie (Modell MEIKO M-iClean HL)

Tabelle 10 gibt auch eine Übersicht der Betriebsparameter der einzelnen Spülmaschinen und nach welchen Standards die Reinigung erfolgt. Vergleiche dazu auch die Übersicht der Regularien und Normen in Kapitel 0. Während Durchlaufreinigungsanlagen auch mechanisch durch hohen Wasserdruck reinigen und dadurch mit vergleichsweise geringen Temperaturen arbeiten können, basiert die Reinigung in den übrigen hier dargestellten Spülmaschinen vorwiegend auf chemisch-thermischen Reinigungsverfahren. **In der DIN EN 17735 wird empfohlen, Teile mit Lebensmittelkontakt im gewerblichen Kontext auf über 80° C zu erhitzen, was einer thermischen Desinfektion entspricht.** Für die thermische Desinfektion besteht ein Zusammenhang zwischen Temperatur und Zeit.²⁷ In bestimmten Anwendungen bspw. bei Obst- und Gemüseboxen oder Boxen für technische Teile kann auf eine thermische Desinfektion vollständig oder teilweise verzichtet werden. Im industriellen Kontext, speziell für Bandspülmaschinen, wird der Einsatz enzymatischer Reinigungsmittel diskutiert, was deutlich geringere Betriebstemperaturen von 30–40 °C erlauben würde und somit ein hohes Energieeinsparpotenzial besitzt (Bertling et al. 30.01.2025). Da Reinigungsanlagen sehr spezifisch für das jeweilige Verpackungssystem sind, werden im Folgenden keine massenbezogenen Verbrauchsdaten wie beim Recycling von PPK und Kunststoffen angegeben, sondern gutspezifische Werte.

4.5.2 Mehrwegbecher aus Kunststoff

Mehrwegbecher können sowohl durch den Endverbraucher (BYO-Systeme), dezentral an der Ausgabestelle (Betriebskantinen, Restaurants, Bäckereien etc.) als auch zentral in großen Spülzentren (v.a. bei Großereignissen) gespült werden. Der Inhalt der Becher (Kalt- oder Heißgetränke) ist in der heutigen Praxis für

²⁷ $t = A_0 / 10^{((T-80)/10)}$ mit einem typischen Desinfektionswert $A_0 = 600$ s. Es ergibt sich für 80 °C eine Desinfektionszeit von 10 min, für 90 °C von 1 min (EN DIN ISO 15883-1).

den Vorgang des Spülvorgangs und das Spülsystem (zentral oder dezentral) unerheblich (Bertling et al. 30.01.2025).²⁸

In kleineren Betrieben wie Restaurants oder Cafés anfallende Becher werden in der Regel dezentral mit Hauben- oder Untertischspülern gereinigt. Allerdings können auch kleinere Ausgabestellen mit Pooldienstleistern zusammenarbeiten, welche Becher abholen und zentral in großen Spülzentren mittels Bandspülanlagen spülen. Damit sind allerdings logistische Herausforderungen verbunden, nicht nur durch die Transportwege entstehen, sondern auch dadurch, dass eine Lagerung von nicht gespülten Bechern über 72 Stunden hinaus nicht zu empfehlen ist, um Schimmelbildung zu vermeiden (Hesseler 07.01.2025). Dies ist wichtig, da der Schimmel den Kunststoff angreifen kann oder zumindest zu optisch irreversiblen Schäden führen kann und das Spülgut so unbrauchbar wird.²⁹ Betreiber von Sportstadien und Konzerthallen lassen ihre Becher in der Regel von externen Dienstleistern (bspw. CUP CONCEPT Mehrwegsysteme GmbH oder Remondis SE) zentral spülen, da bei Großveranstaltungen große Mengen an Spülgut in kurzer Zeit anfallen.³⁰ Auch hier gibt es allerdings Ausnahmen wie die Uber Arena in Berlin, bei der die Becher vor Ort gespült werden (Hesseler 07.01.2025).

Bandspülmaschinen, die spezifisch auf die Reinigung von Bechern konzipiert sind, können pro Waschlinie typischerweise bis zu 8000 Becher pro Stunde reinigen, was aber in der Praxis aufgrund schwankender Auslastung oder hoher Verschmutzung nicht erreicht wird. Die Anlagen sind hochautomatisiert und laufen mit fixen Betriebsparametern (Temperatur, Menge Reinigungsmittel etc.). Lediglich die Bandgeschwindigkeit wird variiert und an den Grad der Verschmutzung angepasst (Bertling et al. 30.01.2025). Die Art des Spülsystems hat maßgebliche Auswirkungen auf die Prozessparameter: Der Wasser- und Energieverbrauch ist bei Hauben- und Untertischspülern deutlich höher als bei Band- und Tunnelspülmaschinen, und nochmals deutlich höher, wenn der Becher vom Kunden (BYO-System), teils sogar per Hand, gespült wird.

Ein zusätzlicher allerdings schwer zu quantifizierender Faktor ist, dass Becher gelegentlich doppelt gereinigt werden: einmal vom Endkunden selbst vor der Rückgabe, um Verunreinigung beim Transport zu vermeiden, sowie ein zweites Mal vor der Befüllung durch die Ausgabestelle. Eine aktuelle Forschungsarbeit des Umweltcampus Birkenfeld adressiert diese Frage, indem sie in ihrer Applikation des Campus-eigenen Mehrwegsystems die Nutzer auffordert anzugeben, ob die Behälter bei der Rückgabe bereits gespült sind (Hartard und Theobald 17.01.2025). Bislang liegen noch keine Ergebnisse vor (vgl. dazu auch Fußnote 25).

²⁸ Nicht so allerdings für das Spülergebnis, da z. B. Schimmelbildung und Ausschuss je nach Inhalt deutlich variiert, siehe dazu auch Kapitel 3.1

²⁹ Allerdings kann dieser Effekt genauso bei der Lagerung von Einwegverpackungen aus Kunststoff oder PPK stattfinden; durch die Regranulation in der Schmelze oder den Auflöseprozess bei der Papierproduktion wird die Schädigung des Materials zwar über den Gesamtstrom dissipiert, ist aber noch vorhanden.

³⁰ Pro Fußballspiel zwischen 4000 (Fußball-Regionalliga) und 100 000 (erste Fußballbundesliga) Becher, beim Karneval bis zu 200 000 Becher (Bertling et al. 30.01.2025).

Ein Getränkebecher kann bei üblicher Anwendung und richtiger Lagerung in der Praxis ca. 50- bis 100-mal verwendet werden (Hesseler 07.01.2025). Die zulässige Zahl von Waschzyklen wird mit bis zu 1000 angegeben (ReCup 2025), dementsprechend wird die Umlaufzahl in der Regel nicht von der Spülfestigkeit, sondern eher durch mechanische Schädigungen bei der Nutzung oder durch den Verlust des Spülguts bestimmt. Häufigster Grund für Materialausschuss in Spülzentren ist Schimmel, gefolgt von anderen Verunreinigungen wie Lippenstift, Kaugummis oder Beschädigungen (bspw. durch Zigaretten) (Hesseler 07.01.2025). Pladerer et al. (2008b) geben für Mehrwegbecher, die bei Bundesligaspielen eingesetzt werden, Umlaufzahlen von 60 bis 217 an, das gewichtete Mittel beträgt 107 Umläufe. Viele weitere Studien geben keine Umlaufzahl vor, sondern berechnen die Umlaufzahl, ab derer ein Break-Even-Point gegenüber dem Einwegsystem erreicht ist. Ein realistischer Wert für die Umlaufzahl für Becher ergibt sich aus der Annahme, dass 15 Zyklen pro Jahr und eine Nutzungsdauer von 5 Jahren erreicht werden können, zu 75 (Bertling et al. 2022). Derzeit sind viele Mehrwegsysteme allerdings noch in der Einführung, sodass die Umlaufzeiten für die Becher sehr lang sind. Eigene Abschätzungen gehen daher von einer aktuellen Umlaufzahl von nur 5 aus, die im weiteren als untere Grenze verwendet wird.

Problematisch ist es, wenn Mehrwegbecher speziell für Veranstaltungen gestaltet werden und von den Nutzenden als Sammelobjekt bewertet werden. In diesen Fällen kann die Nutzungszahl drastisch sinken.

Tabelle 11 zeigt die Energie- und Wasserbedarfe beim Spülen von Bechern, welche aus der Literatur zusammengetragen und bei der Primärdatenerhebung gesammelt wurden. Dabei wurden eine Reihe von Studien außer Acht gelassen, welche Ökobilanzen zum Thema durchgeführt haben, ohne dabei die Sachbilanzdaten zu veröffentlichen, sodass die dort angenommenen Verbrauchsdaten nicht auf den Teilaspekt der Reinigung bezogen werden konnten. Am Ende der Tabelle sind zudem zum Vergleich zwei Bedarfswerte für andere To-go-Lebensmittelverpackungen abgetragen. Die Werte weisen aufgrund der verschiedenen Spülsysteme große Spannbreiten auf.

Tabelle 11: Wasser- und Energiebedarfe beim Spülen von Bechern pro Einheit und Spülvorgang

Reinigungsverfahren	Energiebedarf [kWh/Becher]	Wasserbedarf [L/Becher]	Quelle
Literaturdaten			
Endverbraucher, per Hand	0,093	0,75	(Martin et al. 2018)
Endverbraucher, per Hand	0,109	0,40	(Ligthart 2007)
Endverbraucher, per Hand	0,061	0,50	(Cottafava et al. 2021)
Endverbraucher, unklar	0,018	0,20	(Kauertz et al. 2019)
dezentral, maschinell	0,014	0,14	(Cottafava et al. 2021)
dezentral, maschinell	0,014	0,10	(Pladerer et al. 2008a)
dezentral (?), maschinell	0,070	0,70	(Martin et al. 2018)
zentral, maschinell	0,010	0,23	(Cottafava et al. 2021)
zentral, maschinell	0,018	0,13	(Ligthart 2007)
Primärdaten			
zentral, maschinell	0,008	0,05	Herstellerangaben
zentral, maschinell	0,006	0,03	Herstellerangaben
zentral, maschinell	0,005	0,03	Herstellerangaben
zentral, maschinell	0,021	0,07	Primärerhebung
zentral, maschinell	0,014	0,05	Primärerhebung
Sonstige To-go-Verpackungen für Lebensmittel (Schalen, Boxen)			
Dezentral, maschinell	0,026	0,27	(Gallego-Schmid et al. 2018)
Zentral, maschinell	0,025	0,34	(Yadav et al. 2024)

Die Energieverbräuche von industriellen Spülanlagen waren bei der Primärdatenerhebung in etwa dreimal so hoch wie die aus Herstellerangaben ermittelten Werte. Die Diskrepanz zwischen diesen Werten ist nicht überraschend, da die Anlagen in der Realität bislang selten mit maximaler Kapazität und optimierten Prozessparametern betrieben werden. Dazu kommen noch Verbräuche während des Hochheizens und der Selbstreinigung der Anlagen, sowie die Spülzeiten für die Transportboxen der Becher.³¹ Weiterhin muss auch die notwendige Peripherie (Kühlung, Lüftung etc.) zum tatsächlichen Energieverbrauch des Betriebs gerechnet werden. Messungen der Studien- gruppe um (Kauertz et al. 2019), die als Grundlage für deren ökobilanziellen Vergleich dienen sollten, ergaben sogar siebenfach höhere Werte als die entsprechenden Herstellerangaben.

Für die Auswertung werden im Weiteren nur Daten aus maschineller Reinigung verwendet, da davon ausgegangen werden kann, dass sowohl bei Reinigung in privaten Haushalten, dezentral in der Gastronomie oder zentral bei Pool- oder Reinigungsdienstleistern maschinelle Reinigung dominiert. Für den Endenergieverbrauch und Frischwasserverbrauch erscheinen Werte **von 0,02 kWh und 0,20 L pro Becher** derzeit realistisch. Bei optimierter Betriebsweise in großen

³¹ Platzbedarf pro Box entspricht ca. 50 Bechern.

zentralen Reinigungsanlagen und zunehmender Verbreitung der Systeme sind zukünftig Werte von 0,01 kWh und 0,07 L pro Becher realistisch.

Die Reinigungsanlagen für Becher besitzen üblicherweise einen Haltefinger pro Becher. Die Abstände dieser Finger wie auch die Betriebsweise der Anlage sind fixiert, sodass der Energie- und Wasserverbrauch weitgehend unabhängig von der Bechergröße ist. Üblicherweise werden Becher von 0,3 bis 0,5 L gereinigt.

Die meisten Daten lagen für 0,4 L-Becher vor.

Bezogen auf das Nennvolumen ergeben sich damit bezogen auf einen 0,4 L fassenden Becher typische Werte gemäß Tabelle 12.

Tabelle 12: Verbrauchswerte und Zirkularität bei der Kreislaufführung von Mehrwegbechern aus Kunststoff

Größe	Wert (Literatur, maschinell)	Wert (Praxis, Betrieb)	Wert (Praxis, Her- stelleranga- ben)	Wert (Literatur, Handspülung)
Frischwasserverbrauch [L/L]	0,503	0,150	0,093	1,388
Endenergiebedarf [kWh/L]	0,038	0,045	0,016	0,221
Zirkularität niedrig (wegen geringer Abdeckung)	80 %	80 %	80 %	80 %
Zirkularität hoch (bei Events)	98,7 %	98,7 %	98,7 %	98,7 %

Die Werte für Becher lassen sich gut auf andere Anwendungsfälle, die in zentralen Spülzentren gereinigt werden, übertragen (bspw. To-go-Produkte im Lebensmitteleinzelhandel oder Bowls an Frischetheken (Hesseler 07.01.2025).

4.5.3 Mehrwegboxen aus Kunststoff

Ebenso wie Mehrwegbecher können Boxen dezentral vom Anwender oder zentral in Spülzentren gereinigt werden. Bei Reinigungs- und Desinfektionsgeräten für Mehrwegboxen können zwei Systeme unterschieden werden: das Spritzwassersystem und das Tauchbadsystem mit und ohne Ultraschall, wobei auch eine Kombination beider Systeme möglich ist. Die Systeme können sowohl chargenweise als auch kontinuierlich ausgeführt werden (DIN 10522). Bild 18 zeigt eine handelsübliche Tunnelwaschanlage der Firma Mimasa Washtech SLU für Kisten.

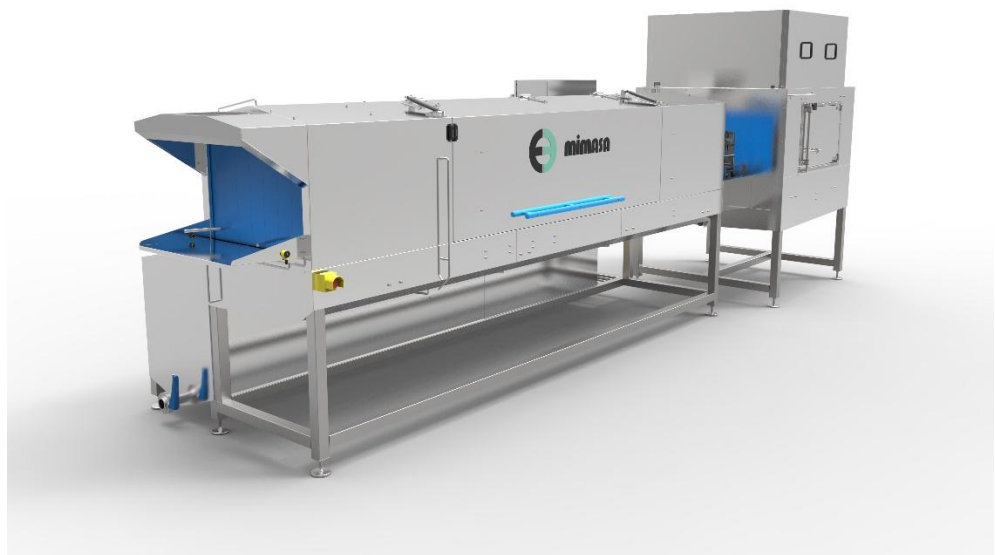


Bild 18: Handelsübliche Tunnelwaschanlage für Kisten (Modell DA-150-MS, Mimasa)

Durchlaufsysteme für Kisten werden in Dimensionen zwischen 100 und 9000 Kisten pro Tunnel und Stunde konstruiert (MIMASA 2025). Je nach Automatisierungsgrad können die Anlagen automatisierte Einrichtungen wie Entstapler, Stapler, Wender, Zufuhr- und/oder Sammelbänder sowie Rückführbänder enthalten. Für große Spülzentren werden stark individualisierte Großanlagen konzipiert, die mehrere Linien und Waschstraßen integrieren. So verfügt beispielsweise das IFCO Spülzentrum in Voerde über drei Waschstraßen mit jeweils drei Linien und reinigt insgesamt bis zu 500 000 Kisten pro Tag bzw. ca. 100 Millionen Kisten pro Jahr (IFCO 2025). Jedes Spülgut durchläuft in der Anlage automatisiert die folgenden Stationen: Depalettieren, Entstapeln, Vorsortieren und Öffnen und wird danach in zwei parallelen Waschtunneln zunächst vorgespült, anschließend gereinigt und desinfiziert, mit Frischwasser gespült. Auch das anschließende Falten, Sortieren, Trocknen und Stapeln, Palettieren und Umreifen erfolgt maschinell (Schaich 29.01.2025).

Tabelle 13 zeigt die in der Literatur identifizierten und während der Studie erhobenen Bedarfe für das Reinigen von Boxen. Auch hier ist anzumerken, dass es eine Reihe weiterer ökobilanzieller Studien gibt, die Ein- und Mehrwegkisten vergleichen, ohne dabei die angenommenen Verbräuche für die einzelnen Prozessschritte (wie das Reinigen oder Recyceln) offenzulegen und die damit für diese Vergleichsstudie unbrauchbar waren, dennoch ist auch hier die Datenlage besser als bei den verglichenen Einwegsystemen, bei denen die Verbräuche vollständig in Ökobilanzdatensätzen integriert sind.

Grundsätzlich zeigt sich, dass die Energie- und Wasserverbräuche vom Grad der Verschmutzung und der Kapazität der Anlage dominiert werden. So sind hohe Werte vor allem bei kleinen Anlagen, die nicht auf die Kistenreinigung optimiert und bei der Reinigung von schwierigen Gütern (bspw.

Boxen für den Transport von Fleisch und Fisch) typisch sind. Industrielle Anlagen, die auf bestimmte Verpackungstypen optimiert sind, und Güter, die als eher unkritisch zu bewerten sind, erreichen hingegen deutlich niedrigere Werte.

Rasines et al. (2024) berichten Umlaufzahlen für Boxen von 140, Levi et al. (2011) geben keine Umlaufzahl vor, sondern führen eine Break-Even-Betrachtung durch, Abejón et al. (2020) gehen von 10 bis 15 Nutzungen pro Jahr bei einer Nutzungsdauer von 10 Jahren aus. Ceballos-Santos et al. (2024) sind deutlich optimistischer und nehmen 120 Umläufe pro Jahr bei einer Nutzungszeit von 10,5 Jahren an (!), nennen aber gleichzeitig einen Ersatzbedarf von 1 %, ohne diesen auf einen Zeitraum zu beziehen. Für die weitere Auswertung wird eine konservative **Umlaufzahl für einfache Spülaufgaben eine Umlaufzahl von 200, für schwierigere von 100 zugrunde gelegt.**

Tabelle 13: Wasser- und Energiebedarfe beim Spülen von Boxen pro Einheit und Spülvorgang

Reinigungs- verfahren	Spülmaschinentyp, Anwendungsfall	Energie- bedarf [kWh/Box]	Wasserbe- darf [L/Box]	Volu- men [L]	Quelle
Literaturdaten					
dezentral	Unbekannt, O+G-Boxen	0,036	0,10	43,2	(Levi et al. 2011)
dezentral	mittlere Industrielle An- lage, Fisch-Boxen	0,290	1,20	20,0	(Ceballos-Santos et al. 2024)
zentral	Industrielle Anlage, O+G-Boxen	0,049	0,19	36,0	(Rasines et al. 2024)
unklar	unbekannt	0,447	0,50	34,2	(Abejón et al. 2020)
Primärdaten					
zentral	Standardanlage, n. d.	0,413	1,29	48,0	Primärerhebung
zentral	Standardanlage, n. d.	0,239	1,18	48,0	Primärerhebung
zentral	Standardanlage, technisches Spülgut,	0,270	0,06	24,6	Primärerhebung
zentral	Kleine Standardanlage, nicht für Kisten optimiert	1,212	1,16	76,0	Primärerhebung
zentral	Industrielle Anlage, O+G-Boxen	0,065	0,19	30,0	Primärerhebung
dezentral	mittlere Industrielle An- lage, Fleisch-Boxen	0,278	1,22	35,0	Primärerhebung

Für die Auswertung werden die Fälle einfache Spülgüter und schwierige Spülgüter unterschieden, geeignete Werte bestimmt, auf das in obiger Tabelle

angegebene Nennvolumen bezogen und mit der konservativen und optimistischen Zirkularität kombiniert. Bezogen auf das Nennvolumen ergeben sich **typische Werte gemäß** Tabelle 14.

Tabelle 14: Verbrauchswerte und Zirkularität bei der Kreislaufführung von Mehrwegboxen aus Kunststoff

Kriterium	Wert (schwierige Spülaufgabe)	Wert (einfache Spülaufgabe)
Frischwasserverbrauch [L/L]	0,0369	0,0063
Endenergiebedarf [kWh/L]	0,0091	0,0022
Zirkularität	99 %	99,5 %

5 Vergleich der Wasser- und Energieverbräuche sowie Zirkularität der beiden Optionen für die Kreislaufschließung

In Folgenden werden die in Kapitel 0 ermittelten Energie- und Wasserverbräuche der beiden Systemvarianten zusammengefasst, verglichen und diskutiert.

5.1 Tabellarischer Gesamtüberblick

Die folgende Tabelle 15 stellt sämtliche ermittelten Daten im Überblick dar. Teilaspekte werden in den folgenden Kapiteln anhand von Grafiken aufgegriffen und illustriert. Der Begriff des relativen Verlustes bezeichnet den Anteil, der nicht zirkuliert, korrigiert um die Materialeffizienz (vgl. Kap. 4.2.2).

Tabelle 15: Gesamtüberblick zu den ermittelten Daten für Endenergie, Frischwasser, Zirkularität und relativer Verlust

Kreislaufsystem (Material, Anwendung)	Endenergie pro Volumen [kWh/L]	Frischwasser pro Volumen [L/L]	Zirkularität [%]	relativer Verlust [%]
BOX				
MW (KS, schwierige Spülaufgabe)	0,009	0,037	99,0%	3,0%
MW (KS, leichte Spülaufgabe)	0,002	0,006	99,5%	1,5%
EW (PPK, Downcycling)	0,040	0,150	82,8%	17,2%
EW (PPK, Food, mech. anspruchsvoll)			17,1%	82,9%
EW (PPK, FCM)			0,0%	100,0%
BECHER				
MW (Literatur, Handspülung)	0,221	1,388	k. A.	k. A.
MW (Praxis, Betrieb, geringe Abdeckung)	0,045	0,150	80%	60%
MW (Praxis, Betrieb, geringe Event)			98,7%	3,9%
MW (Literatur, industr., geringe Abdeckung)	0,038	0,503	80%	60%
MW (Literatur, industriell, Event)			98,7%	3,9%
MW (Herstellerangaben)	0,016	0,093	k. A.	k. A.
EW (KS, Downcycling)	0,086	0,023	23,2%	76,8%
EW (KS, FCM)			0,0%	100,0%
EW (PPK, Downcycling)	0,101	0,270	17,0%	83,0%
EW, mech. (PPK, FCM)			0,0%	100,0%

5.2 Vergleich von Einweg-Boxen aus PPK mit Mehrweg-Boxen aus Kunststoff

Bild 19 zeigt den Endenergiebedarf und Frischwasserverbrauch für die verschiedenen Optionen bei Boxen. Die Literaturdaten für das Spülen von Mehrwegboxen wurden in der Primärerhebung bestätigt und werden daher nicht getrennt ausgewiesen. Die Verbräuche wurden mit Daten der FEFCO sowie ergänzenden Literaturdaten für Boxen aus PPK verglichen (Bild 19).

Grundsätzlich zeigte sich, dass die Reinigung von **Mehrwegboxen** pro Nutzung viel weniger Endenergie und Frischwasser benötigt als das konkurrierende Recycling von PPK-Boxen. Wie stark dieser Effekt ist, hängt im Wesentlichen von der Reinigungsaufgabe ab. Während bei leicht verschmutzten **Mehrwegboxen** bspw. zum Transport von Obst oder Gemüse der Verbrauch **bei Energie nur etwa 1/20** (0,002 kWh/L Verpackungsvolumen) und bei **Frischwasser 1/25** (0,006 L/L Verpackungsvolumen) **des Verbrauchs vom Recyclingprozess für Altpapier zu Karton** aufweisen, benötigen selbst stark verschmutzte Mehrwegkisten bspw. **für Fleisch und Fisch immerhin noch weniger als 1/5 bei Energie und Frischwasser** (0,009 kWh/L bzw. 0,037 L/L Verpackungsvolumen). Dabei ist zu berücksichtigen, dass einige Verpackungsaufgaben in Einwegboxen aus PPK, ohne Beschichtung oder Inliner gar nicht ausgeführt werden können.

Die Daten für die Verbräuche bei Reinigungsanlagen für Mehrweg zeigen sehr deutlich, dass große, industrielle Anlagen deutlich effizienter betrieben werden können (vgl. Kapitel 4.5.3). Da beide Systeme, Karton aus PPK, und Mehrweg aus Kunststoff, technisch weit entwickelt sind, kann der deutliche Vorteil der Mehrwegboxen auch eine Perspektive für andere Mehrwegsyste me aufzeigen, die momentan noch als Nische betrieben werden.

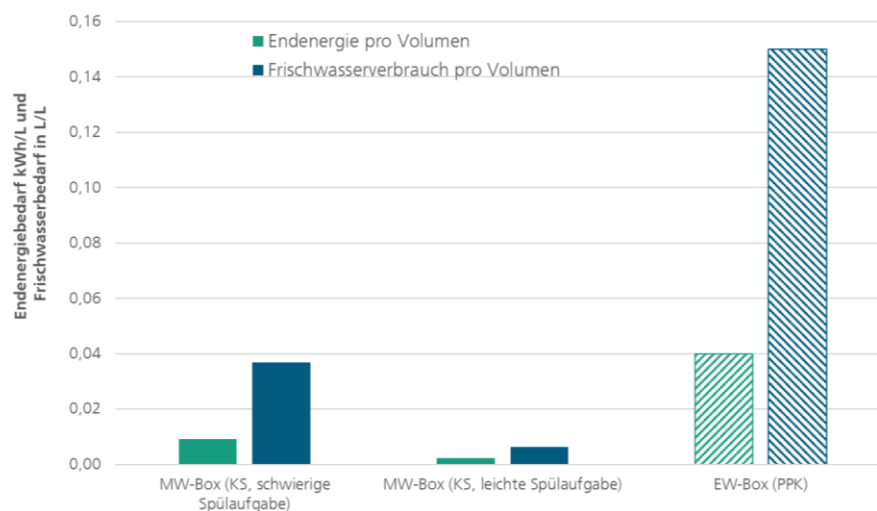


Bild 19: Energie- und Wasserverbrauch von Einweg- und Mehrwegboxen. Bei den Mehrwegboxen wurden neben den Literaturdaten auch Primärdaten (PD) erhoben.

5.3 Vergleich von Einweg-Getränkebechern aus PPK bzw. PP mit Mehrweg-Getränkebechern aus Kunststoff

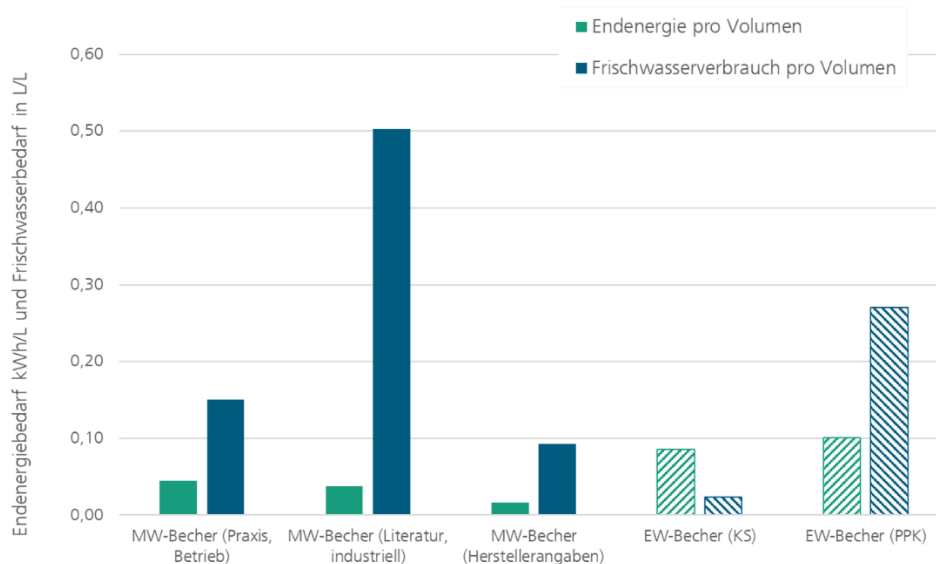


Bild 20 zeigt den Endenergieverbrauch und Frischwasserverbrauch für Becher. Für Mehrwegsysteme wurden drei Verbrauchsgruppen gebildet. Die erste Säulengruppe bildet die Praxis ab, die durch eine Primärdatenerhebung an industriellen Anlagen stattfand. Im Vergleich zu den Literaturdaten (zweite Säulengruppe) wird in der industriellen Mehrwegpraxis weniger als ein Drittel des Frischwassers benötigt, wohingegen der Endenergiebedarf leicht erhöht ist. Dies dürfte daran liegen, da die industrielle Anlagenkapazität derzeit häufig nicht ausgelastet ist. Die Hersteller (dritte Säulengruppe) weisen deutlich niedrigere Endenergieverbrauchswerte aus. Hier liegt für die Zukunft eine Herausforderung, diese Potenziale, z. B. durch eine optimierte Auslastung, zu erschließen.

Vergleicht man die Mehrwegbecher mit Einwegbechern aus Kunststoff oder PPK fällt auf, dass beide Einwegsysteme deutlich mehr Endenergie zur Kreislaufschließung benötigen (0,1 bzw. 0,09 kWh/L). Die beiden Einwegsysteme unterscheiden sich diesbezüglich kaum. Unterschiedlich sind sie hingegen beim Frischwasserbedarf: Hier gelingt es dem Kunststoffrecycling, mit den geringsten Frischwassermengen auszukommen – allerdings auf Kosten einer niedrigen Zirkularität (zur Wechselbeziehung mit der Zirkularität siehe folgendes Kapitel). Ergänzend sind im Diagramm die beiden Verbrauchswerte für Handspülung in rot eingetragen. Diese liegen deutlich über allen anderen Werten. Vor- oder Doppeltreinigung würde die Gesamtwerte nochmals weiter steigen lassen und sollte in beiden Systemen, wenn möglich, vermieden werden.³²

³² Es ist nicht unüblich, dass Einweg-LVP-Verpackungen oder Mehrwegverpackungen von den Konsumenten vor der Entsorgung gespült werden, um Lebensmittelreste zu entfernen und Schimmel zu vermeiden.

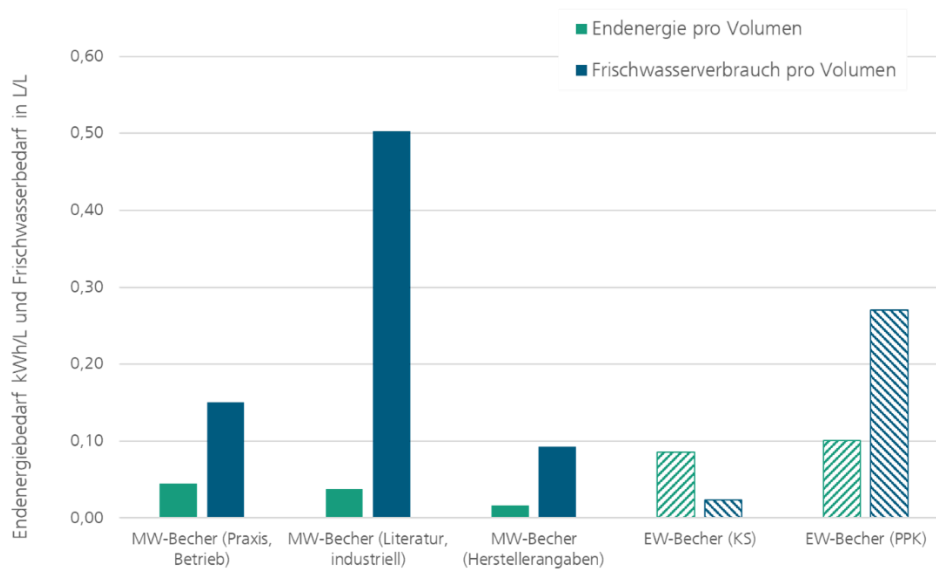


Bild 20: Energie- und Wasserverbrauch von Einweg- und Mehrwegbechern. Bei den Mehrwegbechern wurden neben Literaturdaten auch Primärdaten erhoben.

5.4 Energie und Wasserverbräuche unter Berücksichtigung der erreichten Zirkularität

Wie in Kapitel 0 dargestellt, erreichen die **Einwegsysteme** nur eine sehr **geringe Zirkularität**. Es erscheint daher sinnvoll, diesen Aspekt in die Bewertung miteinzubeziehen. Da Frischwasser und Endenergie als Verbrauchsgrößen formuliert sind, erscheint es sinnvoll, statt der Zirkularität ε_{ges} den **Verlust** $loss_{ges}$ zu verwenden, da dann für alle drei Größen ihre Minimierung ökologisch vorteilhaft ist. In der Tendenz zeigen sich – erwartbare – geringere Verluste bei den Mehrwegverpackungen. Um einen fairen Vergleich herzustellen, sollte allerdings berücksichtigt werden, dass bei jeder verlorenen Mehrwegverpackung mehr Material verlorengeht. Wenn man das in Kapitel 4.2.2 bestimmte **Massenverhältnis** m_{EW}/m_{MW} von Mehrweg- zu Einwegverpackungen von 2,7 für Boxen und 2,8 für Becher zugrunde legt, erhöhen sich die Verluste der Mehrwegsysteme entsprechend. Es lässt sich ein sogenannter relativer Verlust $loss_{rel,MW}$ definieren, der dies berücksichtigt.

$$loss_{rel,MW} = m_{MW}/m_{EW} \times (1 - \varepsilon_{MW}) \quad (6)$$

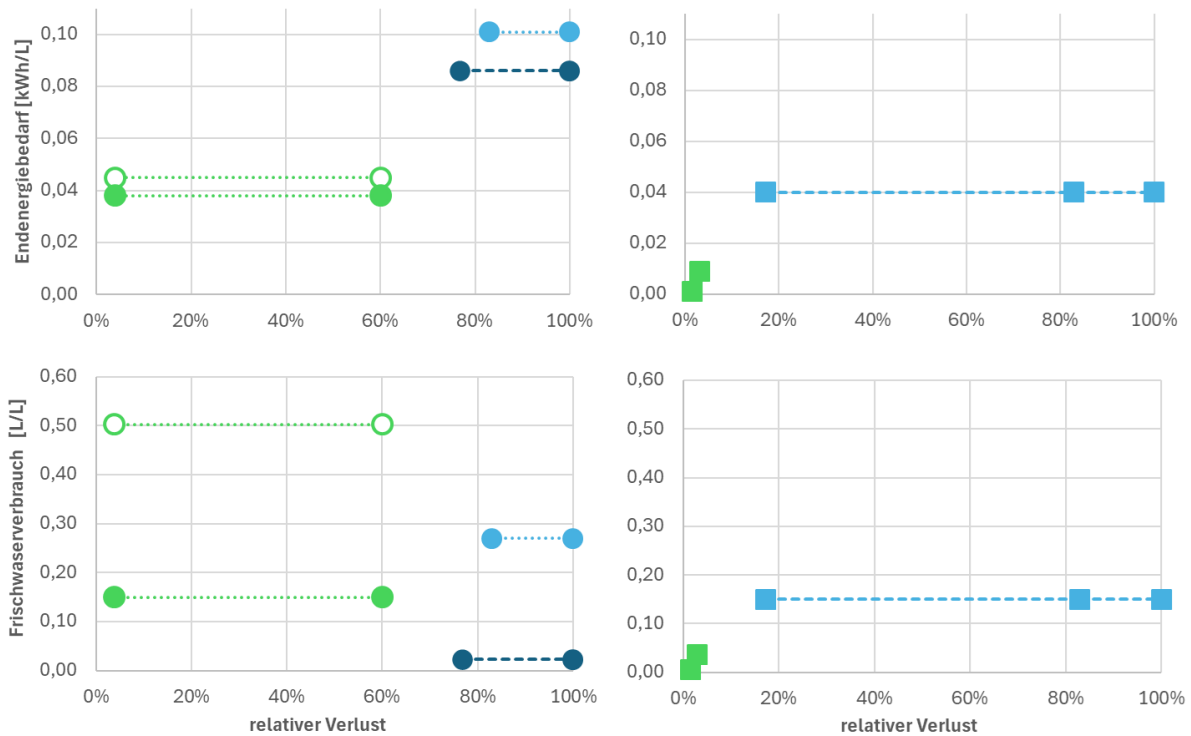


Bild 21 stellt diesen Zusammenhang dar. Es sind für Becher und Boxen die Endenergiebedarfe und Frischwasserverbräuche über die relativen Verluste aufgetragen.

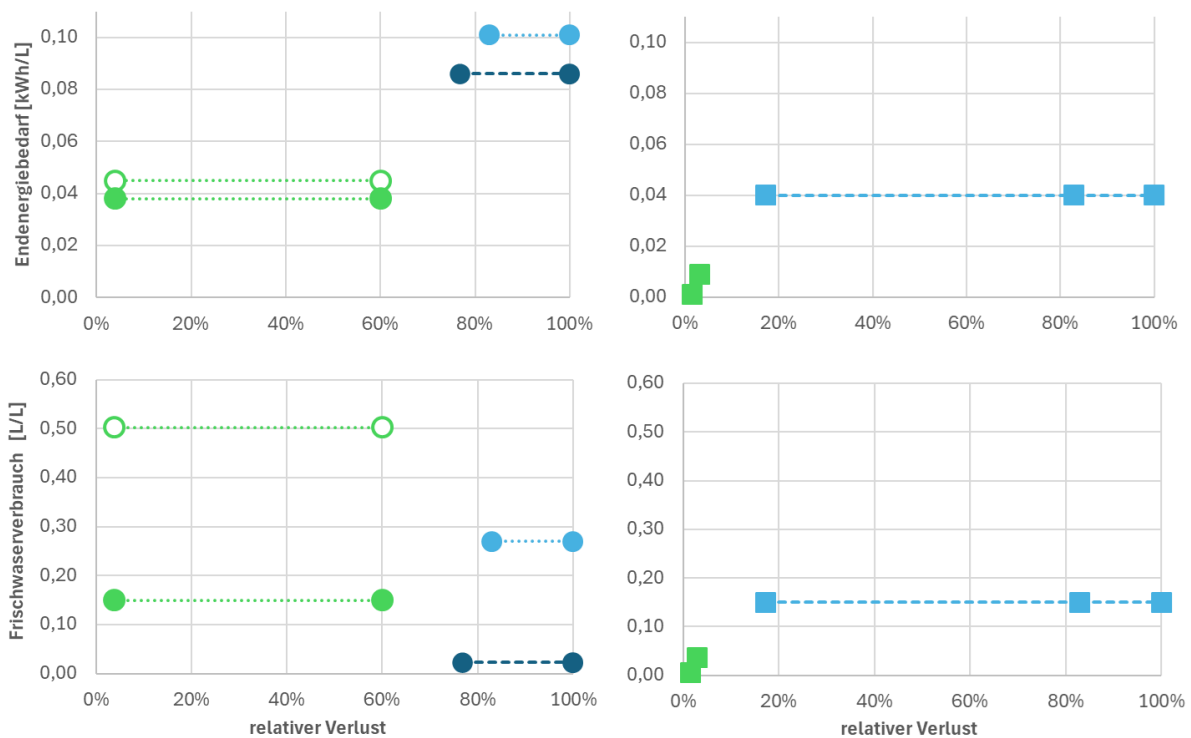


Bild 21: Endenergiebedarf (obere Zeile) und Frischwasserverbrauch (untere Zeile) über den relativen Verlust für Becher (linke Spalte, Kreise) und Boxen (rechte Spalte, Quadrate). Mehrweg (grün; Literaturdaten ungefüllt, eigene Datenerhebung gefüllt), Einweg PPK (hellblau), Einweg Kunststoff (dunkelblau)

Für Einweg-Becher (linke Spalte) wurden jeweils zwei Werte für den Verlust aufgetragen: 100 %, sofern Lebensmittelkontakt als Ziel des Recyclings vorgegeben ist, und 77 % bzw. 82 %, wenn ein Downcycling akzeptiert wird. Für Mehrwegbecher sind der im Rahmen dieser Studie erhobene Wert (grün, gefüllt) und der ältere Literaturwert (grün, ungefüllt) aufgetragen. Die Verlustspanne entspricht zum einen Werten, die auf heute bspw. auf Events erreicht werden, zum anderen Werten, die derzeit für To-go-Becher in offenen Systemen realistisch sind. Die Grafiken zeigen, dass die Mehrwegbecher insbesondere nach der Datenerhebung eine bessere Performance aufweisen. Die Einwegsysteme weisen hohe Materialverluste und gleichzeitig hohe Verbräuche auf; einzige Ausnahme ist der Frischwasserverbrauch bei KS-Einwegbechern, der niedriger ist als bei den konkurrierenden Mehrwegalternativen. Es muss dennoch Anspruch der Mehrwegsysteme sein, die Verluste weiter zu senken. Die Vorteile bleiben nur dann bestehen, wenn Umlaufzahlen deutlich größer 5 (entspricht im Diagramm einem relativen Verlust von 60 %) erreicht werden und wenn die industriellen Spülanlagen in Bezug auf den Wasserverbrauch effizient und mit hoher Auslastung betrieben werden.

Bei den Boxen steht der Kunststoff-Mehrwegbox eine PPK-Einwegbox gegenüber. Die beiden Mehrwegpunkte (grün) sind die leichte und schwierige Spülaufgabe (Obst/Gemüse bzw. Fleisch/Fisch). Bei den Papierboxen werden drei Verluststufen unterschieden: 100 %, wenn Lebensmittelkontakt nicht erreicht werden kann; 83 %, wenn aufgrund mechanischer anspruchsvoller Verpackungsaufgaben nur ein Rezyklatanteil von 17 % möglich ist, wie dies bei Kombinationen aus Kraftliner und Semichemical-Fluting bspw. bei Obst- und Gemüsekartons der Fall ist und 17 %, wenn ein Downcycling für weniger anspruchsvolle Aufgaben (bspw. ein Wellpappenkarton für Anwendungen ohne Lebensmittelkontakt) erlaubt wird. Bei den Boxen zeigt sich bei Endenergiebedarf und Frischwasserbedarf, dass trotz der höheren Verbräuche bei PPK auch die Verluste deutlich höher sind. Dies gilt selbst dann noch, wenn man von der niedrigsten Verlustrate ausgeht – also Downcycling-Anwendungen mit einbezieht.

Bei den Einwegsystemen ist zu erwarten, dass eine **zukünftig** angestrebte und notwendige Verringerung der Verluste bzw. Steigerung der Zirkularität nur durch eine zunehmend komplexe und aufwändige Trenn- und Reinigungstechnik erreicht wird. Dies lässt weiter steigende Energieaufwände und Frischwasserverbräuche erwarten. Die Datenpunkte in den Diagrammen würden sich nach links oben verschieben. Bei den Mehrwegsystemen erfordert eine Verringerung der Verluste eine Hochskalierung der Systeme, was die Auslastung in den Reinigungsanlagen verbessern dürfte und das Potenzial für eine Automatisierung erhöht. Für die Betreiber lohnen sich dann Investitionen in eine verbesserte Reinigungstechnik. Beides sollten den Frischwasser- und Endenergieverbrauch senken. Die Datenpunkte würden sich daher in der Tendenz weiter nach links unten verschieben.

5.5 Vergleich der Untersuchungsergebnisse von Mehrwegbechern und -boxen

Bild 22 zeigt die Energie- und Wasserverbräuche von Mehrwegboxen (erste und zweite Säulengruppe) und Mehrwegbechern (dritte und vierte Säulengruppe). Die Verbrauchswerte der Becher sind deutlich höher als bei leicht (x 45) und sogar als bei stark verschmutzten Boxen (x 4). Wie die Berechnung der spezifischen Materialaufwände (Masse pro Füllvolumen) in Kapitel 6.1 zeigt, lässt sich nur ein Teil dieses Mehrverbrauchs mit dem erhöhten Materialeinsatz bezogen auf das Füllvolumen erklären (etwa 1,8). Die Hersteller der Becherreinigungsanlagen geben geringere Werte an, die bei einer Effizienzsteigerung durch Anpassung der Betriebsweise (Auslastung) erreicht werden könnten (x 2,8 für Energie und x 1,6 für Frischwasser). Es bleibt aber eine Lücke zu den Verbrauchswerten für Boxen. Zum Teil könnte es sich durch die Art der Verschmutzung erklären, die auch bei den Mehrwegkisten für Fleisch und Fisch ursächlich für die höheren Verbrauchsdaten ist. Dies allein dürfte aber bei Trinkbechern, die üblicherweise für wasserlösliche Getränke genutzt werden, nicht als Erklärung ausreichen. Daraus lässt sich schließen, dass vor allem bei Skalierung und Reifegrad der Technologie im Vergleich zu den Boxen deutliche Optimierungspotenziale bestehen.

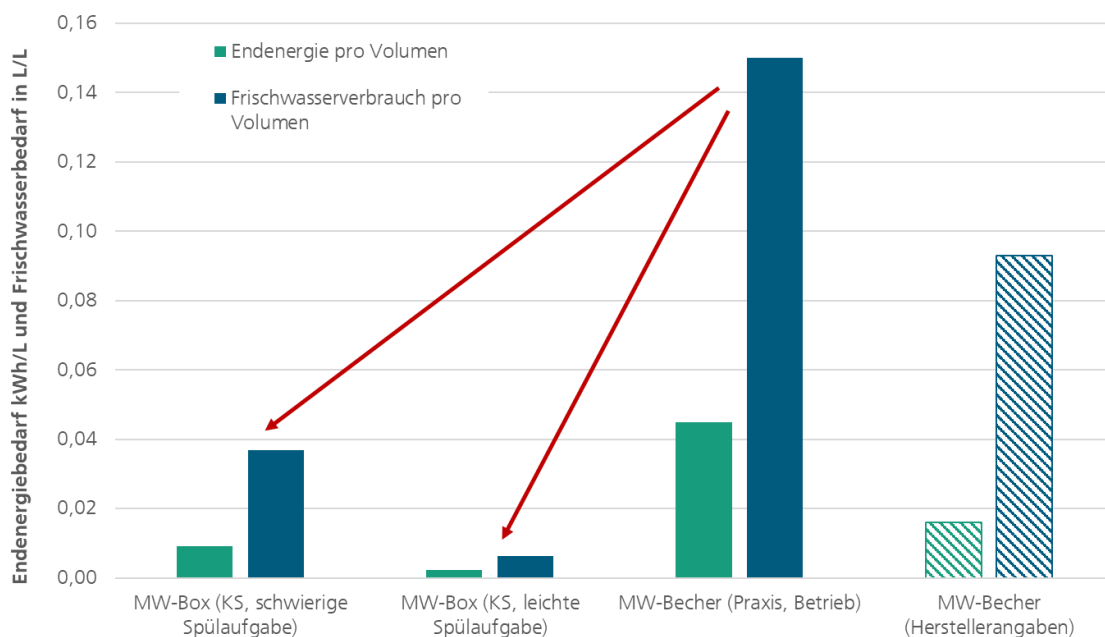


Bild 22: Vergleich des Energie- und Wasserverbrauchs bei Mehrwegbechern und -boxen

6 Fazit und Empfehlungen

6.1 Zur Studie

Dass Mehrwegverpackungen, insbesondere ab Erreichung gewisser Mindestumlaufzahlen, Einwegverpackungen in Bezug auf den Ressourcenverbrauch vorzuziehen sind, ist weitgehend unstrittig. Kritik an Mehrwegsystemen konzentriert sich im Wesentlichen auf die Transportlogistik sowie auf die Wasser- und Energieverbräuche beim Reinigungsprozess. Die vorliegende Analyse zeigt, dass dies zumindest in Bezug auf die Energie- und Wasserverbräuche nicht berechtigt ist. Die Transportaufwände sind stark abhängig von der Verbreitung des Systems und der Stapel- und Nestfähigkeit bzw. Kompaktierbarkeit der Verpackungssysteme und sollten in einer separaten Studie vertieft untersucht werden.

Im Einwegsystem wird der Kreislauf durch Recycling geschlossen, im Mehrwegsystem durch Reinigung und Wiederverwendung. Dies bedeutet, dass beim Mehrweg neben dem Material auch die Produktform erhalten bleibt – was den Energie- und Ressourceneinsatz reduzieren kann. Der Wettbewerb der beiden Systeme lässt sich umschreiben mit **Stoffeinhalt vs. Formeinhalt**.

Dieser Bericht konzentriert sich auf direkte Verbräuche bei der Kreislaufschließung – durch Waschen (Mehrweg) bzw. Sortierung, Aufbereitung und erneuter Formgebung (Einweg). Die **direkten Energie- und Wasserverbräuche** bilden eine wesentliche Grundlage für Sachbilanzanalysen in Ökobilanzstudien und für die technische Optimierung von Prozessen. Die Werte sind dabei leichter interpretierbar und verständlicher als aggregierte Wirkungskategorien von Ökobilanzen. Deshalb ist diese Studie **keine Ökobilanz** und kann diese auch nicht ersetzen. Sie berücksichtigt weder alle Lebenszyklusphasen noch Transport oder Materialherstellung vollständig. Deshalb lassen sich auch keine generellen ökologischen Vorteile für Einweg oder Mehrweg ableiten. Ziel ist vielmehr ein vertieftes Verständnis der Energie- und Wasserverbräuche für die beiden Systeme.

Die Auswahl der **Demonstratoren: To-go-Becher** und **Boxen/Kisten** erfolgte gemeinsam mit dem Auftraggeber (Stiftung Initiative Mehrweg) und wurde anhand ihrer praktischen Relevanz getroffen: To-go-Becher stehen für große und sichtbare Abfallmengen im öffentlichen Raum; Boxen/Kisten repräsentieren hochvolumige Transportverpackungen im B2B-Bereich mit bedeutender logistischer Relevanz. Die Auswahl dieser Verpackungstypen erlaubt eine repräsentative Analyse der Kreislaufführung in zwei unterschiedlichen Nutzungskontexten (Endverbraucher vs. Logistik).

Grundsätzlich hat sich im Rahmen der Studie gezeigt, dass die Datenlage hinsichtlich des Energie- und Wasserverbrauchs sowohl für Einweg- als auch für Mehrwegverpackungen sehr schlecht ist. Stoffdaten und Prozessdaten sind zum großen Teil nicht spezifisch. Durch die Primärdatenerhebung konnte die Situation zumindest für Mehrweg etwas verbessert werden. Dennoch beziehen

sich viele Ökobilanzstudien immer wieder auf veraltete Daten oder Branchendaten, die für konkrete Aufgabenstellung nur wenig repräsentativ sind. Die fehlende Verfügbarkeit und Sichtbarkeit von konkreten Betriebsdaten schafft wenig Anreize für konkrete Verbesserung auf Prozess- und Produktebene.

Empfehlungen

- *Eine regelmäßige Erhebung von Sachbilanzdaten für Einweg- und Mehrwegsysteme und eine Aufschlüsselung der Massenströme am Lebensende in Bezug auf die tatsächlich realisierte Verwertung wäre hilfreich, um eine faire Bewertung zu ermöglichen. Die entsprechenden Daten sollten im Rahmen eines fortlaufenden Monitorings bspw. in Form eines »Circular Packaging Radars« veröffentlicht werden, um den Wettbewerb um die beste Kreislaufstrategie zu intensivieren.*

6.2 Zur rechtlichen Lage von Einweg und Mehrweg

Kunststoffverpackungen sind im Vergleich zu anderen Materialien besonders stark reguliert. Insbesondere für Verpackungen aus recyceltem Kunststoff, die mit Lebensmitteln in Kontakt kommen, bestehen zahlreiche Vorgaben. Die EU-Verordnung 2022/1616 regelt detailliert, unter welchen Bedingungen Kunststoffrezyklate in Lebensmittelverpackungen eingesetzt werden dürfen. Aktuell sind **nur zwei Recyclingverfahren EU-weit zugelassen**: das mechanische Recycling von PET aus Post-Consumer-Abfällen und das Recycling von Produktionsabfällen aus geschlossenen Kreisläufen. Für alle anderen Technologien und Kunststoffarten besteht ein langwieriges Zulassungsverfahren, das mehrere Jahre dauern kann. Dies führt zu einer erheblichen **Rechtsunsicherheit und Investitionshemmung**. Dies ist ein Nachteil für Mehrwegverpackungen, die in der Kategorie der Kleinladungsträger (hier repräsentiert durch Boxen) ausschließlich aus Kunststoff hergestellt werden.

Das **Spannungsfeld** zwischen dem politischen Ziel der Kreislaufführung und den Anforderungen an den Lebensmittelkontakt ist komplex. Die **PPWR** fordert ab 2030 steigende Rezyklateinsatzquoten auch für Lebensmittelverpackungen aus Kunststoff. Gleichzeitig dürfen Rezyklate nur dann eingesetzt werden, wenn sie den sehr strengen Lebensmittelkontakt-Vorgaben entsprechen – was in der Praxis selten realisierbar ist. Somit **bleibt die Kreislaufführung von Einwegverpackungen aktuell faktisch unmöglich**, da geeignete, rechtlich abgesicherte Recyclingpfade fehlen. Allerdings treffen diese Regelungen auch auf Mehrwegverpackungen zu, sofern diese nach 2030 hergestellt werden. Dies ist besonders problematisch, da die Lebensdauern von Mehrwegverpackungen in der Regel zwischen 5 und 20 Jahren liegen und daher kaum genug Rezyklat am Markt verfügbar sein dürften.

Beim Material Papier, Pappe und Karton (**PPK**) ergibt sich eine weitere regulatorische Problematik. Das BfR schließt die Verwendung von PPK aus **gemischter Verpackungssammlung** (z. B. LVP – gelber Sack) für Lebensmittelverpackungen aus, da sich kritische Stoffe nicht sicher ausschließen lassen. Der Nachweis, dass eine Verpackung nicht aus solchen Quellen stammt, ist aber praktisch kaum führbar. Umgekehrt ist der Einsatz von **recyceltem PPK aus der**

blauen Tonne (reines Altpapier) unter bestimmten Bedingungen, insbesondere stofflichen Anforderungen, erlaubt. In der Praxis werden jedoch auch in Papiermühlen **PPK-Getränkebecher oft aussortiert**, weil Beschichtungen oder Verunreinigungen problematisch sind. Ein geschlossener PPK-Kreislauf liegt daher meist nicht vor.

Im Gegensatz zu Einwegverpackungen ist bei **Mehrwegverpackungen** die Nutzungsphase, insbesondere die Reinigung, **detailliert normiert**. Hier existieren klare Vorschriften – z. B. DIN 10522 und DIN EN 17735 – zur Hygiene, zur Reinigungswirksamkeit und zu den Anforderungen an Reinigungsverfahren und Testintervallen. Diese Normen sichern den hygienischen Wiedereinsatz und unterliegen auch einer externen Kontrolle (z. B. durch Veterinärämter).

Problematisch ist zudem, dass die PPWR materialbezogene **Mehrwegquoten** vorschreibt, von denen **PPK explizit ausgenommen** ist. Dadurch entsteht ein regulatorischer Anreiz zur Substitution von Kunststoff durch PPK und zur Umgehung der politisch gewollten Steigerung des Mehrweganteils. Gleichzeitig gelten die hohen **Rezyklatanforderungen auch für Kunststoff-Mehrwegsysteme**, was deren Einsatz zusätzlich erschwert.

Insgesamt zeigt sich, dass die regulatorischen Rahmenbedingungen **kein konsistentes System** zur Förderung echter Kreislaufführung darstellen. Insbesondere bei Einwegverpackungen – unabhängig vom Material – ist eine geschlossene Kreislaufführung aktuell kaum realisierbar.

Empfehlungen

- *Die Umsetzung der in 1935/2004 möglichen Einzelmaßnahme für PPK, also einer spezifischen Verordnung für Lebensmittelverpackungen aus PPK, sollte in Betracht gezogen werden. Kunststoffbeschichtete PPK müssen besonderen Anforderungen unterliegen, da sie eine potenzielle Quelle für Mikroplastik darstellen und nur schwer zu rezyklieren sind.*
- *Die BfR-Empfehlungen und die darauf aufbauenden CEPI-Richtlinien darüber, welche Altpapiersorten für den Lebensmittelkontakt geeignet sind, sind vage und können unterschiedlich interpretiert werden. Geeignete Sorten nach DIN EN 643 werden nicht genannt. Eine klarere Stellungnahme könnte Industrie und Verbrauchern mehr Sicherheit geben.*
- *Der durch die Kommission in der PPWR angekündigte und zum 31.12.26 fällige Bericht über das Vorhandensein von besorgniserregenden Stoffen in Verpackungen und Verpackungsbestandteilen sollte PPK- und Kunststoffverpackungen gleichermaßen adressieren.*
- *Das PPK-Verpackungen in der PPWR von der Mehrwegquote ausgenommen werden, kann zu einer Verschiebung von Kunststoff-Einweg zu PPK-Einweg führen. Die Ergebnisse dieser Studie zeigen insbesondere für die in Artikel 29 PPWR explizit genannten B2B-Verpackungen der Kisten, Kästen, Fässer etc., dass dies eine falsche Entwicklung wäre. Hier ist ein intelligenter Regulierungsansatz zu entwickeln.*

6.3 Kontamination und Dekontamination im Verpackungskreislauf

Für eine erfolgreiche Reinigung müssen **Chemie, Mechanik, Temperatur** und **Zeit** des Prozesses aufeinander abgestimmt sein (Sinnerscher Kreis), um hygienisch einwandfreie Ergebnisse zu erzielen. Wasser übernimmt dabei eine zentrale Rolle zur Wärmeübertragung und zum Abtransport gelöster Stoffe. Für die thermische Desinfektion ist das Zusammenspiel von Temperatur und Zeit relevant.

Die Reinigung von Verpackungen oder Verpackungsmaterialien im Kreislauf ist sowohl im Mehrweg- als auch im Recyclingsystem relevant. Nach Gebrauch sind Mehrwegverpackungen häufig mit **organischen Rückständen** wie Fetten, Proteinen und Kohlenhydraten behaftet, die mikrobielles Wachstum, etwa von Bakterien und Schimmel, fördern können. Ebenso problematisch sind anhaftende Getränkereste oder intensive Aromen wie Kaffee oder Curry, die schwer zu entfernen sind. Auch **chemische Bestandteile** etwa Bisphenol A (BPA) bei Polycarbonat oder Phthalate als Weichmacher können bei hohen Spültemperaturen freigesetzt werden.

Bei der Aufbereitung von **Kunststoffrezyklaten** aus Post-Consumer-Abfällen treten zusätzliche Herausforderungen auf. Neben organischen Verunreinigungen sind häufig auch Fremdstoffe wie Etikettenkleber, Druckfarben, Metalle und nicht sortenreine Kunststoffe enthalten. In großtechnischen Waschanlagen erfolgt eine mehrstufige Reinigung: Zunächst werden die Kunststoff-Flakes bei Temperaturen von etwa 80–90 °C mit Lauge und Tensiden intensiv gewaschen, dann mechanisch behandelt und mehrfach gespült. In der anschließenden Extrusion bei 200–280 °C werden Mikroorganismen abgetötet, Feststoffe herausgefiltert und flüchtige Stoffe entfernt. Diese Schritte sind notwendig, um Rezyklate zu erhalten, die für **Lebensmittelkontakt** geeignet sind – ein Ziel, das nur mit erheblichem technischem Aufwand erreichbar ist.

Die Reinigbarkeit hängt stark von den **Materialeigenschaften** ab. Viele Kunststoffe sind **hydrophob**, benötigen also spezielle Mittel zur Benetzung. Zugleich zeigen einige Materialien, etwa PET oder PS, bei höheren Temperaturen **Formverzug**. Daher sind Kunststoffe wie Polypropylen (PP) oder HDPE für Mehrweganwendungen besonders geeignet, da sie widerstandsfähig gegen Hitze und Chemikalien sind. Dies wird durch Prüfverfahren gemäß DIN EN 12875 belegt, die z. B. bis zu 125 Spülzyklen simuliert.

Auch im **Papierrecycling** bestehen Hürden. Neben papierimmanenten Stoffen wie Beschichtungen und Druckfarben sind häufig auch **PFAS** sowie organische Rückstände enthalten. Die Reinigung erfolgt durch Prozesse wie Deinking, Kochen und mehrfaches Waschen, oft bei Temperaturen über 100 °C. Trotz dieser Maßnahmen lassen sich nicht alle unerwünschten Stoffe vollständig entfernen. Deshalb ist eine hochwertige stoffliche Wiederverwertung zu neuen Lebensmittelverpackungen meist nicht möglich – stattdessen erfolgt oft ein Downcycling zu anderen Produkten.

Empfehlung

- *Die spezifischen Reinigungseigenschaften von Kunststoffen sollten im Rahmen von Forschungsarbeiten adressiert werden. Dabei wären Design- und Materialoptimierungen, welche die vollständige Trocknung erleichtern und die Kratzeranfälligkeit reduzieren, besonders interessant.*
- *Wie in Kapitel 6.2 dargelegt, sollte die Migration von Stoffen aus PPK-Verpackungen in Lebensmittel vertieft geprüft, die Erreichung von vorgeschriebenen Grenzwerten wie denen von PFAS in der PPWR geprüft und daraus klare Handlungsanweisungen für die Papierindustrie zum Einsatz von Altpapier abgeleitet werden, die die Ziele der Lebensmittelsicherheit und Kreislaufführung ausgewogen berücksichtigen.*

6.4 Prozesse und Anlagen zur Kreislaufführung

Der LVP-Pfad ist wesentlich für die Sammlung und Verwertung von Kunststoffabfällen. Doch bereits vor der eigentlichen **stofflichen Verwertung** gehen ca. 36 % des Einwegkunststoffs verloren, da er als Fehlwurf im Restabfall oder anderen nicht geeigneten Sammelsystemen landet, exportiert, nicht in typischen Zeiträumen zurückgegeben oder gelittert wird. Der Kunststoffstrom im LVP-Pfad verringert sich trotz komplexer und innovativer Prozess- und Anlagentechnik über die Sortierung, Aufbereitung und Regranulation weiterhin zu stark. Am Ende sind nur noch **23,2 % der ursprünglichen Kunststoffmenge** verfügbar.

Bei der Herstellung von PPK scheinen Einsparungen bei den Verbräuchen und Steigerungen beim Altpapiereinsatz kaum noch möglich, da diese Anlagen seit langem optimiert werden. Wichtiger wäre ggf. eine Schadstoffentfrachtung des Gesamtstroms, der mittelfristig die Verwertung im Lebensmittelkontakt ermöglicht. Dies würde aber gleichzeitig auch einen Verzicht auf recyclingkritische Beschichtungen und Barrieren erfordern, die dann wiederum den Einsatzbereich von PPK einschränken würden. Doch auch im PPK-Kreislauf werden zwar höhere Recyclingraten erreicht, bezieht man aber die inländisch verwerteten Mengen auf den inländischen Verbrauch, erreicht die **Zirkularität von PPK ca. 72 %**. Dieser Wert wird erreicht oder gar überschritten, wenn man Downcycling (in dem Sinne, dass Lebensmittelkontaktmaterialien für andere Anwendungen ohne Lebensmittelkontakt genutzt werden) zulässt. Schließt man Lebensmittelkontakt aus, wie dies die BfR-Empfehlung für gemischt gesammelte PPK-Abfälle fordert, kann die Zirkularität auf null sinken.

Die Zirkularität von **Mehrwegverpackungen** ist deutlich höher. Hier ist allerdings anzumerken, dass bei einem fairen Vergleich mit Einwegverpackungen aufgrund des Masseverhältnisses von ca. 2,7 bis 2,8 (Mehrweg/Einweg) der Verlust von Mehrwegverpackungen deutlich stärker ins Gewicht fällt und der »relative Verlust« sinkt. Mehrwegsyste me mit einer Zirkularität von unter 80 % (entspricht einer Umlaufzahl von 5) verlieren daher ihre ökologischen Vorteile.

Empfehlung

- *Die Zirkularität im Einwegsystem ist heute in Bezug auf Mengen und Qualitäten (kein Lebensmittelkontakt) nicht ausreichend. Bei dem zukünftig erwartbaren Versuch, diese durch verbesserte Sortierung und Aufbereitung zu steigern, sollte kritisch geprüft werden, wie sich Energie- und Wasserverbräuche entwickeln. Hier wären konkrete Vorgaben sinnvoll.*
- *Die tatsächlichen Rücklaufquoten für Mehrwegsysteme im B2C-Bereich sind teilweise unbekannt, u. a. da Kunden Poolsysteme und BYO-Systeme nicht klar trennen. Das Wissen der Kunden muss vertieft werden und die Eindeutigkeit der Kennzeichnung hinsichtlich System und korrektem Entsorgungspfad verbessert werden.*
- *Hohe Rücklaufquoten sind für eine positive Bewertung von Mehrwegsystemen essenziell. Gerade bei Verpackungen wie Bechern, welche an den Endverbraucher ausgegeben werden, sind Anstrengungen und kreative Lösungen (bspw. digitale Erfassung) erforderlich, um diese Quoten zu erhöhen.*

6.5 Vergleich der Energie- und Wasserverbräuche zwischen den Systemen

Bei den **Boxen** ist das Ergebnis des Vergleichs eindeutig. Um Mehrwegboxen für die Rückführung in den Kreislauf aufzubereiten, sind deutlich weniger Energie und Wasser erforderlich – **rund 1/40 (1 kWh/m³) des Energieverbrauchs und 1/15 (5 L/m³) bei Frischwasser** im Vergleich zu Kartons aus PPK. Gleichzeitig liegt die Zirkularität der Boxen bei über 99 %, während die PPK-Boxen für Nicht-Lebensmittelkontaktanwendungen eine Zirkularität von 83 % erreichen, die sich aufgrund von mechanischen Anforderungen auf 17 % bzw. bei Anwendungen im Lebensmittelkontakt auf 0 % reduzieren. Die Primärdatenerhebung der Verbräuche für die Mehrwegbox hat die Literaturdaten bestätigt.

Bei den **Bechern** hat die Primärdatenerhebung mit 0,15 L/L um ca. 70 % reduzierte Frischwasserverbräuche ergeben als die mittleren Literaturwerte zeigen; bezieht man nur Daten für maschinelles Spülen aus der Literatur ein, werden die dortigen Werte für den Energieverbrauch in etwa bestätigt. Gleichzeitig wird aber auch deutlich, dass das Handspülen weder in einem Mehrwegsystem noch in einem Einwegsystem (vor Entsorgung in der gelben Tonne) eine ökologisch sinnvolle Option ist. Die **Mehrwegbecher weisen im Ergebnis einen deutlich niedrigeren Energieverbrauch als Einwegbecher aus PPK (0,101 kWh/L) und auch als Kunststoffeinwegbecher auf (0,86 kWh/L)**. Der **Wasserverbrauch ist allerdings bei einem Kunststoffbecher im Rahmen des Recyclings mit (0,023 L/L) deutlich niedriger als beim Reinigen (0,150 kWh/L)**. In Bezug auf die Zirkularität sind die Mehrwegbecher überlegen. Berücksichtigt man, dass die Kreislaufverluste bei Mehrwegverpackungen mit einem höheren Massenverlust verbunden sind, ist die heutige Zirkularität der Mehrwegbecher allerdings noch nicht zufriedenstellend. Allerdings muss berücksichtigt werden, dass weder die Rezyklate von PPK- noch Kunststoff-Einwegbechern erneut im Lebensmittelkontakt Anwendung finden.

Empfehlungen

- *Der Aufwand für die Kreislaufführung in Einwegsystemen ist immens. Zahlreiche Studien zeigen, dass Mehrwegsysteme dort, wo sie sich etablieren konnten und eine gewisse Verbreitung und Maßstab erreichen, deutlich überlegen sind. Es sollten daher in Regularien nicht nur Mehrwegquoten vorgegeben werden, sondern konkrete Maßnahmen zur Implementierung und Skalierung von Mehrwegverpackungssystemen regulatorisch unterstützt werden.*

6.6 Förderung von Mehrwegverpackungen

Die Ergebnisse dieser Studie, die eine Überlegenheit der Mehrwegsysteme in den drei zentralen Umweltaspekten Endenergiebedarf, Frischwasserverbrauch und Kreislaufverluste zeigen, stehen im Widerspruch zur Marktdominanz der Einwegsysteme. Auch wenn es dafür viele ökonomische, systemische und psychologische Gründe geben mag, ist es aus wissenschaftlicher Sicht naheliegend zu prüfen, welche Verantwortung die Wissenschaft selbst dabei hat und wie der Vergleich der **Forschungsaktivitäten** zu den beiden Kreislauf-Systemen aussieht. Dazu wurde recherchiert, wie viele Forschungsvorhaben es gibt, die Fragestellungen zum Recycling adressieren und wie viele sich mit Aspekten von Mehrwegsystemen beschäftigen. Es zeigt sich, dass es im Bereich Recycling viele Hundert öffentlich geförderter Vorhaben gibt, während die Zahl der Projekte zu Mehrweg im niedrigen zweistelligen Bereich liegt (Bild 23).

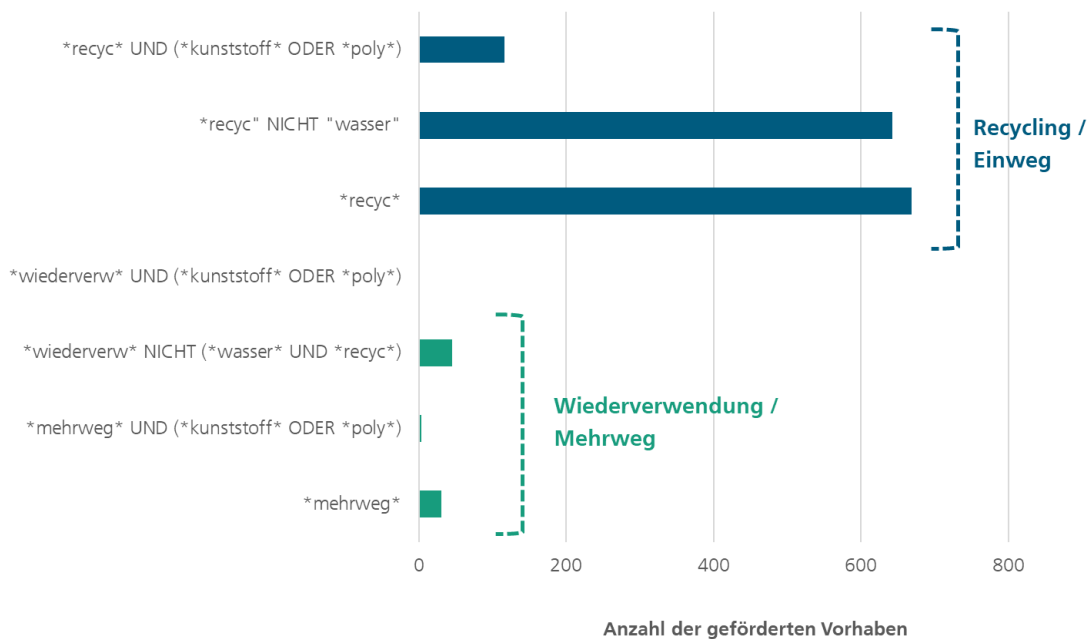


Bild 23: Anzahl der vom Bund geförderten Vorhaben nach Schlagworten gemäß Förderkatalog des Bundes, orange: Vorhaben mit Bezug zum Recycling, blau: Vorhaben mit Bezug zu Mehrwegsystemen (Verbundvorhaben werden gemäß der Anzahl der Konsortialteilnehmer gezählt.)

Empfehlung

- *Wenn Mehrwegsysteme einen stärkeren Stellenwert erhalten sollen, ist eine Veränderung der Forschungsagenden und Förderschwerpunkte erforderlich. Aspekte der Spültechnik und Rückführlogistik sowie der Materialeignung sollten dabei adressiert werden.*

7 Anhang A – Glossar

Für die Definition der hier verwendeten Konzepte und Begriffe siehe das Fraunhofer »Glossary on Reuse / Mehrweg Glossar« unter [Glossary Reuse-Glossar Mehrweg](#).

8 Anhang B – Interviewpartner

Zur Ermittlung von Energie- und Wasserverbräuchen bei der Reinigung von Mehrwegverpackungen wurden Interviews mit den folgenden Unternehmen geführt:

Tabelle 16 Interviewpartner Mehrwegsysteme

Unternehmensname	Interviewpartner	Interviewer	Datum
GST Worldwide Logistics GmbH	Enrico Plogsties, (Geschäftsführer)	Jürgen Bertling, Jan Blömer	Fragen schriftlich beantwortet per E-Mail am 4./19.11.2024
Hammelmann Service GmbH & Co. KG, WBG Pooling GmbH & Co. KG	Jörg Hammelmann (Geschäftsführer) Felix Borgerding (Managing Director)	Jürgen Bertling, Jan Blömer	19.02.2025
IFCO Systems GmbH	Dirk Schaich, (Director Supply Chain) Nikolei Kitzberger (Werksstudent)	Jürgen Bertling, Jan Blömer	29.01.2025
MEIKO Deutschland GmbH	Ludger Hesseler, (Key Account Manager Mehrweg)	Lena Bersch, Jürgen Bertling	07.01.2025
Betreiber einer Becherwaschanlage, anonym	N.N.	Lena Bersch, Jürgen Bertling, Jan Blömer	30.01.2025

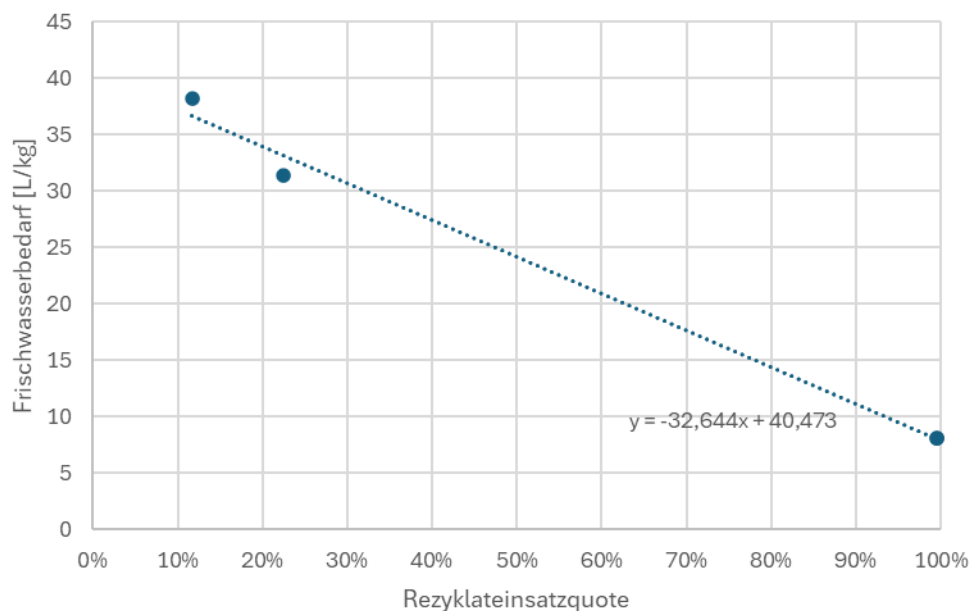
Des Weiteren wurden vertiefende Gespräche mit folgenden Unternehmen und Institutionen geführt:

Unternehmensname	Interviewpartner	Datum	Thema
BfR	Thomas Tietz	13.03.25	Einsatz von Altpapier für Lebensmittelanwendungen

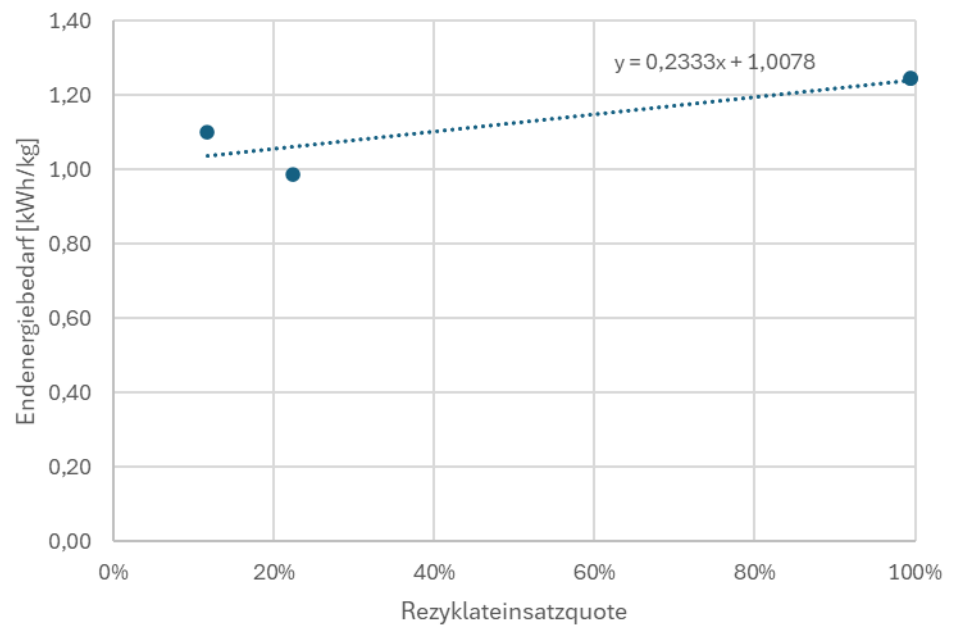
	(Head of Unit Safety Food Contact)		
bvse	Romy Kölmel	19.12.24	Rückgewinnung von Fasern aus beschichteten Spezialpapieren, gesetzliche Bestimmungen Papierrecycling
INEOS Styrolution	Frank Eisenträger	25.02.25	Recycling von PS für Lebensmittelanwendungen, gesetzliche Anforderungen
HS Pforzheim	Raphael Schill (Research Associate)	01.08.25	Becheranteile in der LVP-Fraktion, Verpackungsstudie 2024
Umweltcampus Birkenfeld, HS Trier	Susanne Hartard, Klara Theobald	17.01.25	Datensammlung zu Mehrwegsystemen

9 Anhang C – Diverse Berechnungen

Frischwasserbedarfs für PPK, lineare Ausgleichsgerade zur Extrapolation auf 100 % Recycling



Endenergiebedarf für PPK, lineare Ausgleichsgerade zur Extrapolation auf 100 % Recycling



10 Literaturverzeichnis

Abejón, R.; Bala, A.; Vázquez-Rowe, I.; Aldaco, R.; Fullana-i-Palmer, P. (2020): When plastic packaging should be preferred: Life cycle analysis of packages for fruit and vegetable distribution in the Spanish peninsular market. In: *Resources, Conservation and Recycling* 155. DOI: 10.1016/j.resconrec.2019.104666.

AKGGS (2023): Hygienesiches Spülen von Mehrweggeschirr aus Kunststoff im Außer-Haus-Betrieb für die sichere Wiederverwendung. Hg. v. Arbeitskreis Gewerbliches Geschirrspülen. Online verfügbar unter https://www.akggs.de/pressemitteilung/AK%20GGS_Merkblatt_Mehrweg_DE_01.2023.pdf#:~:text=Auch,zuletzt%20gepr%2528ft%20am%2010.06.2025.

APR (2025): The Plastic Recycling Process. Hg. v. Association of Plastics Recyclers. Online verfügbar unter <https://plasticsrecycling.org/how-recycling-works/>, zuletzt geprüft am 10.06.2025.

Arbeitskreis Gewerbliches Spülen (2025): Sammlung Normen, Gesetze und Regelwerke für Gewerbliches Spülen. Online verfügbar unter https://www.akggs.de/normen/PDFs/Normensammlung_%28V02_2025%29.pdf, zuletzt geprüft am 21.06.2025.

Auer, Maximilian; Eberle, Simon; Detering, Leon; Dubb, Lars; Schill, Raphael; Karatopi, Kiriaki (2025): präziSort - Ergebnisse der Verpackungsstudie. Online verfügbar unter https://www.hs-pforzheim.de/forschung/institute/institut_fuer_werkstoffe_und_werkstofftechnologien_prueflabor_fuer_materialuntersuchungen/verpackungsstudie, zuletzt geprüft am 24.07.2025.

AWARE: What is AWARE? Hg. v. WULCA. Online verfügbar unter <https://wulca-waterlca.org/aware/what-is-aware/>, zuletzt geprüft am 30.04.2025.

Begley, S. (2013): Science for hire - Trial over plastic exposes disclosure deficit, 18.07.2013. Online verfügbar unter Science for hire - Trial over plastic exposes disclosure deficit, zuletzt geprüft am 10.06.2025.

Behrens, Rudolf; Janßen, Ingrid; Kuhn, Ekart; Zimmermann, Peter (2018): Entwicklungen und Trends im Markt der Mehrweg Transport Verpackungen in Deutschland und Europa. Hg. v. EKUPAC.

Bertling, Jürgen; Blömer, Jan; Bersch, Lena (30.01.2025): Befragung und Datensammlung zu Spülpraxis von Mehrwegbechern im Zuge der Studie »Wash-Reuse« im Auftrag der Stiftung Initiative Mehrweg. geführt von Bertling, Jürgen; Bersch, Lena; Blömer, Jan. Interview mit Interviewpartner 1, Betreiber einer Becherwaschanlage.

Bertling, Jürgen; Dobers, Kerstin; Kabasci, Stephan; Schulte, Anna (2022): Kunststoffbasierte Mehrwegsysteime in der Circular Economy. Online verfügbar unter <https://publica.fraunhofer.de/entities/publication/7b363a1e-7283-4ed8-8fd1-3578e05ed0e6/details>, zuletzt geprüft am 04.11.2022.

Bezeraj, Erion; Debie, Simon; Arraez, Francisco J.; Reyes, Pablo; van Steenberge, Paul H. M.; D'hooge, Dagmar R.; Edeleva, Mariya (2025): State-of-the-art of industrial PET mechanical recycling: technologies, impact of contamination and guidelines for decision-making. In: *RSC Sustainability* 3 (5), S. 1996–2047.

Biedermann, Maurus; Grob, Koni (2010): Is recycled newspaper suitable for food contact materials? Technical grade mineral oils from printing inks. In: *Eur Food Res Technol* 230 (5), S. 785–796. DOI: 10.1007/s00217-010-1223-9.

Binderup, M. L.; Pedersen, G. A.; Vinggaard, A. M.; Rasmussen, E. S.; Rosenquist, H.; Cederberg, T. (2002): Toxicity testing and chemical analyses of recycled fibre-based paper for food contact. In: *Food additives and contaminants* 19 Suppl, S. 13–28. DOI: 10.1080/02652030110089878.

BKV (Hg.) (2024): Stoffstrombild Kunststoffe in Deutschland 2023 - Zahlen und Fakten zum Lebensweg von Kunststoffen. Kurzfassung. Conversio Market & Strategy GmbH. Online verfügbar unter <https://www.bkv-gmbh.de/files/bkv/studien/Kurzfassung%20Stoffstrombild%202023.pdf>.

BMEL (2017): Regulatorische Maßnahmen zu Mineralöl in Lebensmittelkontaktmaterialien und Lebensmitteln. Hg. v. U. Galle-Hofmann. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft. Online verfügbar unter <https://www.bfr.bund.de/cm/343/regulatorische-massnahmen-zu-mineraloel-in-lebensmittelkontaktmaterialien-und-lebensmitteln.pdf>.

BMUKN (2025): Wie viele Einweg-Becher werden jährlich verbraucht? Wie viele landen in der Umwelt? Hg. v. Bundesministerium für Umwelt, Klimaschutz, Naturschutz und nukleare Sicherheit. Online verfügbar unter <https://www.bundesumweltministerium.de/FA1060>, zuletzt geprüft am 10.09.2025.

Boz Noyan, E. C. (2024): Mechanical recycling of post-consumer polyethylene packaging waste. Thesis for the degree of doctor of philosophy. Online verfügbar unter https://research.chalmers.se/publication/542858/file/542858_Fulltext.pdf?utm_source=chatgpt.com, zuletzt geprüft am 10.06.2025.

Brown, Erina; MacDonald, Anna; Allen, Steve; Allen, Deonie (2023): The potential for a plastic recycling facility to release microplastic pollution and possible filtration remediation effectiveness. In: *Journal of Hazardous Materials Advances* 10, S. 100309. DOI: 10.1016/j.hazadv.2023.100309.

Bulach, W.; Dehoust, G.; Mayer, F.; Möck, A. (2022): Ökobilanz zu den Leistungen der dualen Systeme im Bereich des Verpackungsrecyclings. Öko-Institut e.V. Berlin, Darmstadt. Online verfügbar unter https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Duale_Systeme_Oekobilanz_Endbericht.pdf.

Bundesamt für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit (BVL) (2025): Rechtliche Rahmenbedingungen für Lebensmittelkontaktmaterialien. Hg. v. BVL. BVL. Online verfügbar unter https://www.bvl.bund.de/DE/Arbeitsbereiche/03_Verbraucherprodukte/03_AntragstellerUnternehmen/08_Rechtsvorschriften/02_LMKontaktmaterialien/bgs_LMKontaktmaterialien_rechtliche_grundlagen_node.html;jsessionid=637C66B35EA927E399D0A1CAE4DFAC20.internet962, zuletzt geprüft am 08.07.2025.

Bundesinstitut für Risikobewertung (2023): Empfehlung XXXVI Papiere, Kartons und Pappen für den Lebensmittelkontakt. BfR. Online verfügbar unter <https://www.bfr.bund.de/cm/343/XXXVI-Papiere--Kartons-und-Pappen-fuer-den-Lebensmittelkontakt.pdf>, zuletzt geprüft am 18.02.2025.

Castellani, F.; Aigner, J.; Berglykke Aagaard, S. (2022): Comparative Life Cycle Assessment (LCA). Packaging Solutions for the food segment. Ramboll. Online verfügbar unter https://www.fefco.org/sites/default/files/2022/FEFCO_Comparative_LCA_study.pdf.

Caye, N.; Marasus, Stefan; Nguyen, U.; Schüler, Kurt (2025): Bundesweite Erhebung von Daten zum Verbrauch von Getränken in Mehrweggetränkeverpackungen. Bezugsjahr 2022. Hg. v. Umweltbundesamt. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11850/publikationen/03_2025_texte_mehrweggetraenkeverpackungen_kor.pdf, zuletzt geprüft am 10.06.2025.

Ceballos-Santos, Sandra; Sousa, David Baptista de; García, Pablo González; Laso, Jara; Margallo, María; Aldaco, Rubén (2024): Exploring the environmental impacts of plastic packaging: A comprehensive life cycle analysis for seafood distribution crates. In: *The Science of the total environment* 951, S. 175452. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.175452.

Cendon Garcia, D. (2025): Vytal Global secures €14.2 million to scale tech-driven reusable packaging. Hg. v. EU startups.com. Online verfügbar unter <https://www.eu-startups.com/2025/03/vytal-global-secures-e14-2-million-to-scale-tech-driven-reusable-packaging/>, zuletzt aktualisiert am 11.03.2025, zuletzt geprüft am 10.06.2025.

CEPI (2016): Recovered Paper Quality Control Guidelines. CEPI. Online verfügbar unter <https://www.cepi.org/wp-content/uploads/2022/02/PaperforRecyclingQuality-Control-GuidelinesWITHANNEX.pdf>, zuletzt geprüft am 19.01.2025.

CEPI (2019): Food Contact Guidelines for the Compliance of Paper & Board Materials and Articles. Industry Guideline. European association representing the paper industry. Online verfügbar unter https://www.cepi.org/wp-content/uploads/2020/09/Food-Contact-Guidelines_2019.pdf, zuletzt geprüft am 17.01.2025.

CEPI (2025): KEY Statistics 2024. European pulp & paper industry. Hg. v. CEPI. Online verfügbar unter <https://www.cepi.org/wp-content/uploads/2025/07/Cepi-2024-Key-Statistics.pdf>, zuletzt geprüft am 01.10.2025.

Ceretti, Daniel V. A.; Edeleva, Mariya; Cardon, Ludwig; D'hooge, Dagmar R. (2023): Molecular Pathways for Polymer Degradation during Conventional Processing, Additive Manufacturing, and Mechanical Recycling. In: *Molecules (Basel, Switzerland)* 28 (5). DOI: 10.3390/molecules28052344.

Coperion (2025): Desodorierung im Kunststoff-Recycling: Schluss mit üblen Gerüchen. Hg. v. Coperion GmbH. Online verfügbar unter <https://coperion.com/de/industrien/kunststoff-recycling/kunststoff-recycling-geruchsentfernung#:~:text=Bereits%20bei%20der%20mechanischen%20Vorbehandlung,Weitere%20St%C3%B6rger%C3%BCche%20des>, zuletzt geprüft am 10.06.2025.

Cottafava, Dario; Costamagna, Mattia; Baricco, Marcello; Corazza, Laura; Miceli, Davide; Riccardo, Luigi E. (2021): Assessment of the environmental break-even point for deposit return systems through an LCA analysis of single-use and reusable cups. In: *Sustainable Production and Consumption* 27, S. 228–241.

Cruz, S. A.; Zanin, M. (2003): Evaluation and identification of degradative processes in post-consumer recycled high-density polyethylene. In: *Polymer Degradation and Stability* 80 (1), S. 31–37. DOI: 10.1016/S0141-3910(02)00379-8.

CupPrint (2025): Double Wall Recyclable Paper Cups. Online verfügbar unter https://cupprint.com/product-category/recyclable-double-wall-paper-cups/?utm_source=chatgpt.com, zuletzt geprüft am 27.09.2025.

CVUA Stuttgart; Freistaat Sachsen; TU Dresden; Kantonales Labor Zürich (2012): Ausmaß der Migration unerwünschter Stoffe aus Verpackungsmaterialien aus Altpapier in Lebensmitteln. Ein Entscheidungshilfeprojekt des Bundesministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz. Hg. v. BELV. BELV.

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

Deutsche Umwelthilfe e.V. (Hg.) (2015): Becherheld – Mehrweg to go. DUH-Becherheldkampagne 2015. Online verfügbar unter <https://www.duh.de/becherheld/>, zuletzt geprüft am 16.12.2021.

Die Papierindustrie (2025): Leistungsbericht Papier. Online verfügbar unter https://www.papierindustrie.de/fileadmin/0002-PAPIERINDUSTRIE/07_Dateien/XX-LB/PAPIER_2025_Leistungsbericht_digital.pdf.

Eisenträger, Frank (25.02.2025): Recyclingprozess für PS in Lebensmittelanwendungen und Herausforderungen der gesetzlichen Rahmenbestimmungen (EU 2022/1616). geführt von Bersch, Lena. Digital via MsTeams.

EMF (2015): Material Circularity Indicator. Hg. v. Ellen MacArthur. Online verfügbar unter <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/material-circularity-indicator>, zuletzt aktualisiert am 03.05.2015, zuletzt geprüft am 23.07.2025.

EPRC (2024): Monitoring Report 2023 European. Declaration on Paper Recycling 2021-2030. Hg. v. European Paper Recycling Council (EPRC). Online verfügbar unter https://austropapier.at/wp-content/uploads/2024/08/23-00-EPRC-Recycling-Report.pdf?utm_source=chatgpt.com, zuletzt geprüft am 01.10.2025.

Euro Pool System (Hg.) (2021): Gemeinsam zur Kreislauf-Lieferkette. Online verfügbar unter <https://www.europoolsystem.com/de/>, zuletzt geprüft am 14.12.2021.

Europäische Kommission (2006): VERORDNUNG (EG) Nr. 2023/2006 DER KOMMISSION vom 22. Dezember 2006 über gute Herstellungspraxis für Materialien und Gegenstände, die dazu bestimmt sind, mit Lebensmitteln in Berührung zu kommen. (EG) Nr. 2023/2006. Fundstelle: EUR-Lex (L 384), S. 75–78. Online verfügbar unter <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=celex%3A32006R2023>.

Europäische Kommission (2011): Verordnung über Materialien und Gegenstände aus Kunststoff, die dazu bestimmt sind, mit Lebensmitteln in Berührung zu kommen. EU 10/2011, vom 2015. Fundstelle: Official Journal of the European Union. In: *Official Journal of the European Union*. Online verfügbar unter <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:02011R0010-20150226&from=MT>, zuletzt geprüft am 30.03.2022.

Europäische Kommission (2022): Verordnung (EU) 2022/1616 der Kommission vom 15. September 2022 über Materialien und Gegenstände aus recyceltem Kunststoff, die dazu bestimmt sind, mit Lebensmitteln in Berührung zu kommen, und zur Aufhebung der Verordnung (EG) Nr. 282/2008 (Text von Bedeutung für den EWR). EK.

Europäische Kommission (2025a): Union register of novel technologies, recyclers, recycling processes, recycling schemes and decontamination installations. Informationsportal der Europäischen Kommission zu Lebensmittelkontaktmaterialien. Online verfügbar unter https://food.ec.europa.eu/food-safety/chemical-safety/food-contact-materials/plastic-recycling_en#union-register-of-novel-technologies-recyclers-recycling-processes-recycling-schemes-and-decontamination-installations, zuletzt aktualisiert am 11.07.2025, zuletzt geprüft am 11.07.2025.

Europäische Kommission (2025b): Verordnung (EU) 2025/351 zur Änderung der Verordnung (EU) Nr. 10/2011 über Materialien und Gegenstände aus Kunststoff, die dazu bestimmt sind, mit Lebensmitteln in Berührung zu kommen, zur Änderung der Verordnung (EU) 2022/1616 über Materialien und Gegenstände aus recyceltem Kunststoff, die dazu bestimmt sind, mit Lebensmitteln in Berührung zu kommen, und zur Aufhebung der Verordnung (EG) Nr. 282/2008 sowie zur Änderung der Verordnung (EG) Nr. 2023/2006 über gute Herstellungspraxis für Materialien und Gegenstände, die dazu bestimmt sind, mit Lebensmitteln in Berührung zu kommen. Verordnung EU

2025/351, vom 21.02.2025. Online verfügbar unter https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=OJ:L_202500351, zuletzt geprüft am 08.07.2025.

Europäisches Parlament (2004): Verordnung (EG) Nr. 852/2004 über Lebensmittelhygiene, vom 04.03.2021. Fundstelle: EUR-Lex. Online verfügbar unter <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:02004R0852-20210324>, zuletzt geprüft am 08.07.2025.

Europäisches Parlament (2025): Verordnung (EU) 2025/40 des Europäischen Parlaments und des Rates über Verpackungen und Verpackungsabfälle, zur Änderung der Verordnung (EU) 2019/1020 und der Richtlinie (EU) 2019/904 sowie zur Aufhebung der Richtlinie 94/62/EG. PPWR. Online verfügbar unter https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/HTML/?uri=OJ:L_202500040, zuletzt aktualisiert am 14.02.2025, zuletzt geprüft am 14.02.2025.

Europäisches Parlament; Europäische Kommission (2004): REGULATION (EC) No 1935/2004 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 27 October 2004 on materials and articles intended to come into contact with food and repealing Directives 80/590/EEC and 89/109/EEC. Rahmenverordnung EU 1935/2004. Fundstelle: Official Journal of the European Union. In: *Official Journal of the European Union* (L 338/4).

European Directorate for the Quality of Medicines & HealthCare (EDQM) (2021): Paper and board used in food contact materials and articles. Technical Guideline.

FEFCO (Hg.) (2018): European Database for Corrugated Board Life Cycle Studies. Corrugated Packaging; Cepi ContainerBoard. Online verfügbar unter <https://www.fefco.org/download/file/fid/2626>, zuletzt geprüft am 10.12.2021.

FEFCO (2022): Recycling vs. Reuse for Packaging. Bringing the Science into the Packaging Debate. Online verfügbar unter https://www.fefco.org/sites/default/files/2022/FEFCO_Visual_Overview_v8.1.pdf, zuletzt geprüft am 02.09.2022.

FEFCO (2024): European Database for Corrugated Board Life Cycle Studies. Hg. v. FEFCO. Online verfügbar unter https://www.fefco.org/lca/data?utm_source=chatgpt.com, zuletzt geprüft am 01.10.2025.

Finish (2025): Kann ich Kunststoff in der Spülmaschine reinigen? Hg. v. RB Hygiene Home AG. Online verfügbar unter <https://www.finish.ch/geschirrspuel-leitfaden/einraumen/kunststoff/>, zuletzt geprüft am 10.06.2025.

Fischer, Thomas (02.05.2025): So verringert sich der Abfall nicht. Interview. 320° Deutschlands Online-Magazin für die Circular Economy.

Foteinis, Spyros (2020): How small daily choices play a huge role in climate change: The disposable paper cup environmental bane. In: *Journal of Cleaner Production* 255, S. 120294.

Gallego-Schmid, Alejandro; Mendoza, Joan Manuel F.; Azapagic, Adisa (2018): Improving the environmental sustainability of reusable food containers in Europe. In: *The Science of the total environment* 628-629, S. 979–989. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.02.128.

Gandhi, Neeti; Farfaras, Nicholas; Linda Wang, Nien-Hwa; Chen, Wan-Ting (2021): Life Cycle Assessment of Recycling High-Density Polyethylene Plastic Waste. In: *Journal of Renewable Materials* 9 (8), S. 1463–1483.

Gesellschaft für Verpackungsmarktforschung mbH (GVM) (2018): Abfallaufkommen durch Einweggeschirr und andere Verpackungen für den Sofortverzehr. Online verfügbar unter

https://www.nabu.de/imperia/md/content/nabude/abfallpolitik/181022_gvm-studie_einweggeschirr_sofortverzehr.pdf, zuletzt geprüft am 23.03.2022.

DIN EN 17735, 2023: Gewerbliche Spülmaschinen – Hygieneanforderungen und Prüfung.

GKV (2022): Neue Regeln für Kunststoff-Rezyklate im Kontakt mit Lebensmitteln. Leitlinien.

Glausitz, Josie (2014): Kunststoff mit Nebenwirkungen. Online verfügbar unter [gefaehrlich-sind-bisphenol-a-und-seine-ersatzstoffe/1285126](#), zuletzt geprüft am 11.06.2025.

Gneuß (2025): Entgasung und Dekontamination. Hg. v. Gmneuß Kunststofftechnik GmbH. Online verfügbar unter <https://www.gneuss.com/de/turnkey/entgasung-und-dekontamination/#:~:text=Entgasung%20und%20Dekontamination%20von%20Polymeren,Ein%20Hersteller%20von%20Verpackungsfolien>, zuletzt geprüft am 10.06.2025.

Gnoffo, Chiara; Arrigo, Rossella; Frache, Alberto (2025): Mechanical recycling of HDPE-based packaging: Interplay between cross contamination, aging and reprocessing. In: *Polymer Degradation and Stability* 236, S. 111290. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2025.111290.

Grummt, S. (2022): Praxis der Sortierung und Verwertung von Verpackungen im Sinne des §21 VerpackG 2021/2022. TEXTE 125/2022. Teilbericht 1. Umweltbundesamt. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2023-01-05_texte_125-2022_praxis_der_sortierung_und_verwertung_von_verpackungen.pdf, zuletzt geprüft am 18.07.2025.

Grummt, S.; Fabian, M. (2023): Praxis der Sortierung und Verwertung von Verpackungen im Sinne des § 21 VerpackG 2021/2022. Teilbericht 2. Hg. v. UBA. Dessau-Roßlau (TEXTE, 120), zuletzt geprüft am 15.07.2025.

Hartard, Susanne; Theobald, Klara (17.01.2025): Austausch zu Forschungsaktivitäten zu Mehrwegverpackungen am Umweltcampus Birkenfeld der Hochschule Trier. geführt von Bersch, Lena; Bertling, Jürgen. Online.

Hesseler, Ludger (07.01.2025): Befragung und Datensammlung zu Prozessdaten von MEIKO Band- und Haubenspülmaschinen im Zuge der Studie »Wash-Reuse« im Auftrag der Stiftung Initiative Mehrweg. geführt von Bertling, Jürgen; Bersch, Lena. Virtuell, via Teams.

Hirsilä, Paula (2023): Recycled plastic, paper, and board in food contact materials - overview of regulations. Measurelabs. Online verfügbar unter <https://measurlabs.com/blog/recycled-food-contact-materials/>, zuletzt geprüft am 16.07.2025.

Höke, Ulrich (2013): Forderungen der Papierfabriken an die Qualität des Altpapiers für die Herstellung grafischer Papiere. Qualität des gesammelten Altpapiers und Aufbereitungsverfahren. In: Thomé-Kozmiensky, K. und d. Goldmann (Hg.): Recycling und Rohstoffe (Recycling und Rohstoffe, 6).

Huhtamaki (2025): Microwavable cups and food containers. Online verfügbar unter https://www.huhtamaki.com/en-us/north-america/consumer-goods/microwave-hot-cup/?utm_source=chatgpt.com, zuletzt geprüft am 03.10.2025.

IFCO (2025): IFCO Smartcycle - Service Center Operations. Online verfügbar unter <https://www.youtube.com/watch?v=QlQivOD3vJQ>, zuletzt geprüft am 09.07.2025.

IHO (2024): Reinigung und Desinfektion in der professionellen (Groß-)Küche. Hg. v. Industrieverband Hygiene und Oberflächenschutz, zuletzt geprüft am <https://www.iho.de/wp-content/uploads/09.01.2024-IHO-Broschuere-Grosskuechenhygiene-A5-07->

1.pdf#:~:text=Gem%C3%A4%C3%9F%20dem%20Sinnerschen%20Kreis%20stellen,ist%20dieses%20jeweils%20nur%20in.

Jeswani, Harish; Krüger, Christian; Russ, Manfred; Horlacher, Maike; Antony, Florian; Hann, Simon; Azapagic, Adisa (2021): Life cycle environmental impacts of chemical recycling via pyrolysis of mixed plastic waste in comparison with mechanical recycling and energy recovery. In: *The Science of the total environment* 769, S. 144483.

Jin, Huiying; Gonzalez-Gutierrez, Joamin; Oblak, Pavel; Zupančič, Barbara; Emri, Igor (2012): The effect of extensive mechanical recycling on the properties of low density polyethylene. In: *Polymer Degradation and Stability* 97 (11), S. 2262–2272. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2012.07.039.

Joana Almeida; Marie Le Pellec; Jonas Bengtsson (2018): Reusable coffee cups life cycle assessment and benchmark.

Johansson, Anders; Hallmans, Göran; Holm, Stig E.; Olofsson, Carin; Gref, Rolf; Svensson, Kjetil et al. (2001): Microflora in paperboard with various contents of recycled fibers. In: *Nordic Pulp & Paper Research Journal* 16 (1), S. 40–45. DOI: 10.3183/npprj-2001-16-01-p040-045.

Kaitinnis, Nina (2019): Ökobilanzieller Vergleich von zwei Abfallsortieranlagen für Leichtverpackungen nach altem und neuem Stand der Technik. Bachelorarbeit. TH Bingen, Bingen.

Kasper, Johann B.; Parker, Luke A.; Postema, Sander; Höppener, Elena M.; Leighton, Alexandra H.; Finnegan, Alexander M. D. et al. (2025): Losses and emissions in polypropylene recycling from household packaging waste. In: *Waste management (New York, N.Y.)* 191, S. 230–241.

Kauertz, b.; Schlecht, S.; Markwardt, S.; Rubik, F.; Heinrich, J.; Kolbe, P.; Hake, Y. (2019): Untersuchung der ökologischen Bedeutung von Einweggetränkebechern im Außer-Haus-Verzehr und mögliche Maßnahmen zur Verringerung des Verbrauchs. Hg. v. Umweltbundesamt (TEXTE, 29/2019). Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019-02-20_texte_29-2019_einweggetraenkebechern_im_ausser-haus-verzehr_final.pdf.

Kent, R. (2011): Energy Management in Plastic Processing. A Signposting Guide by The British Plastic Federation. Hg. v. BFP.

Knappe, F.; Reinhardt, J.; Kauertz, b.; Oetjen-Dehne, R.; Buschow, N.; Ritthoff, M. et al. (2021): Technische Potenzialanalyse zur Steigerung des Kunststoffrecyclings und des Rezyklateinsatzes. Hg. v. Umweltbundesamt (TEXTE, 92/2021).

Knoben, Niek; Vanhouttem, Max; Wypkema, Aike; Subramanian, Nithya (2025): Monitoring Antioxidant Consumption and Build-Up in Polypropylene During Open-Loop and Closed-Loop Mechanical Recycling. In: *Materials (Basel, Switzerland)* 18 (7). DOI: 10.3390/ma18071640.

Kölmel, Romy (19.12.2024): Herausforderungen für Papierverarbeitung durch beschichtete Papierverpackungen (Wachs, PE) und Lebensmittelverunreinigungen. geführt von Bersch, Lena. Telefonisch.

Krämer, Johannes; La Guedes de Cruz, Gema Carmen; Kern, Wolfgang; Roitner, Julia; Witschnigg, Andreas; Rittmannsberger, Franz; Schnetzinger, Karl (2024): Increasing the melt viscosity of post-consumer recycled polypropylene via E-Beam techniques. In: *Radiation Physics and Chemistry* 222, S. 111846. DOI: 10.1016/j.radphyschem.2024.111846.

Kunststoffindustrie Online (2023): Schmelzefilter verbessert Kosteneffizienz bei Kunststoffrecycling. Hg. v. Kunststoffindustrie Online. Online verfügbar unter <https://www.kunststoffindustrie->

online.de/produktion/schmelzefilter-verbessert-kosteneffizienz-bei-kunststoffrecycling#:~:text=sich%20zum%20Filtrieren%20der%20g%C3%A4ngigen,Speziell%20im%20Folienrecycling%20er%C3%B6ffnet,zuletzt%20gepr%C3%BCft%20am%2010.06.2025.

Langberg, Håkon A.; Arp, Hans Peter H.; Castro, Gabriela; Asimakopoulos, Alexandros G.; Knutsen, Heidi (2024): Recycling of paper, cardboard and its PFAS in Norway. In: *Journal of Hazardous Materials Letters* 5, S. 100096. DOI: 10.1016/j.hazl.2023.100096.

Larrain, Macarena; van Passel, Steven; Thomassen, Gwenny; van Gorp, Bart; Nhu, Trang T.; Huysveld, Sophie et al. (2021): Techno-economic assessment of mechanical recycling of challenging post-consumer plastic packaging waste. In: *Resources, Conservation and Recycling* 170, S. 105607.

DIN 10522, 2006: Lebensmittelhygiene - Gewerbliches maschinelles Spülen von Mehrwegkästen und Mehrwegbehältnissen für unverpackte Lebensmittel - Hygieneanforderungen, Prüfung.

DIN 10516, 2020: Lebensmittelhygiene - Reinigung und Desinfektion.

Lebensmittelverband Deutschland (Hg.) (2020): Merkblatt "Pool-Geschirr". Hygiene beim Umgang mit Mehrweggeschirren innerhalb von Pfand-Poolsystemen. Online verfügbar unter <https://www.lebensmittelverband.de/de/lebensmittel/sicherheit/hygiene/hygiene-beim-umgang-mit-mehrweg-bechern-behaeltnissen-pool-geschirr>, zuletzt geprüft am 17.03.2022.

Lebensmittelverband Deutschland e.V. (2019): MERKBLATT „Coffee to go“-Becher. Hygiene beim Umgang mit kundeneigenen Bechern zur Abgabe von Heißgetränken in Bedienung oder Selbstbedienung.

Lebensmittelverband Deutschland e.V. (2020): Merkblatt „Mehrweg-Behältnisse“. Hygiene beim Umgang mit kundeneigenen Behältnissen zur Abgabe von Lebensmitteln in Bedienung oder Selbstbedienung. Berlin.

Levi, Marinella; Cortesi, Sara; Vezzoli, Carlo; Salvia, Giuseppe (2011): A Comparative Life Cycle Assessment of Disposable and Reusable Packaging for the Distribution of Italian Fruit and Vegetables. In: *Packag. Technol. Sci.* 24 (7), S. 387–400. DOI: 10.1002/pts.946.

Lewis, Yvonne; Gower, Alexandra; Notten, Philippa (2021): Single-use beverage cups and their alternatives. Recommendations from Life Cycle Assessments. Online verfügbar unter <https://www.lifecycleinitiative.org/library/single-use-beverage-cups-and-their-alternatives-lca/>, zuletzt geprüft am 04.08.2021.

Ligthart, T. N. (2007): Single use Cups or Reusable (coffee) Drinking Systems: An Environmental Comparison. TNO. Netherlands. Online verfügbar unter <https://www.tno.nl/media/2915/summary-research-drinking-systems.pdf>.

LUBW (2020): 03 03 03 Zellstoffherstellung, Papierherstellung. Abfallsteckbrief im Rahmen des Informationsportals Abfallbewertung IP@. Hg. v. Informationsportal Abfallbewertung. Online verfügbar unter https://www.abfallbewertung.org/repgen.php?char_id=0303_Altpa&report=ipa&kapitel=1&lang_id=de&avv=&synon=>active=no, zuletzt geprüft am 22.09.2025.

Martin, S.; Bunsen, A.; Ciroth, A. (2018): Case Study Ceramic Cup vs. Paper Cup. Greendelta GmbH. Online verfügbar unter

<https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahU-KEwi8x8m889v2AhWPlqQKHbOkAbIQFnoECAYQAQ&url=https%3A%2F%2Fnexus.openlca.org%2Fws%2Ffiles%2F6229&usg=AOvVaw0NCfTz81occ9BIJY-qtujm>.

Meyer, J.; Schubert, A.; Trautmann, A.; Kirschbaum, S.; Kausch, C.; Probst, T. (2009): Leitfaden Energieeffizienz für die Recyclingindustrie. Hg. v. Arbeitsgemeinschaft Branchenenergiekonzept Recycling.

MIMASA (2025): Kistenwaschanlagen - Produktportfolio. Online verfügbar unter <https://mimasa.com/de/start.html>, zuletzt geprüft am 09.07.2025.

MM Group (2025): Recycled cartonboard with barrier for safe food packaging. Hg. v. Mayr-Melnhof Karton Aktiengesellschaft. Online verfügbar unter https://mm.group/board-paper/innovation/foodboard/?utm_source=chatgpt.com, zuletzt geprüft am 03.10.2025.

Nielsen, T.; Damant, A. P.; Castle, L. (1997): Validation studies of a quick test for predicting the sorption and washing properties of refillable plastic bottles. In: *Food additives and contaminants* 14 (6-7), S. 685–693. DOI: 10.1080/02652039709374580.

Pachaly, Patrick (2021): Coffee-to-Go Becher (ReCup). Interview mit Kerstin Dobers und Jürgen Bertling. Digital via Microsoft Teams.

DIN EN 643, 01.11.2014: Papier, Karton und Pappe – Europäische Liste der Altpapier-Standardsorten; Deutsche Fassung EN 643:2014, zuletzt geprüft am 18.02.2025.

Papstar (2025a): Pappbecher "pure" unbeschichtet. Hg. v. Papstar GmbH. Online verfügbar unter <https://www.papstar.com/solutions/pappbecher-recycling>, zuletzt geprüft am 27.09.2025.

Papstar (2025b): Pappbecher-Recycling. Hg. v. Papstar GmbH. Online verfügbar unter <https://www.papstar.com/solutions/pappbecher-recycling>, zuletzt geprüft am 27.09.2025.

Pin, Jean-Mathieu; Soltani, Iman; Negrier, Keny; Lee, Patrick C. (2023): Recyclability of Post-Consumer Polystyrene at Pilot Scale: Comparison of Mechanical and Solvent-Based Recycling Approaches. In: *Polymers* 15 (24). DOI: 10.3390/polym15244714.

Pivnenko, Kostyantyn; Laner, David; Astrup, Thomas F. (2016): Material Cycles and Chemicals: Dynamic Material Flow Analysis of Contaminants in Paper Recycling. In: *Environmental Science & Technology* 50 (22), S. 12302–12311. DOI: 10.1021/acs.est.6b01791.

Pladerer, Christian; Meissner, Markus; Dinkel, Fredy; Zschokke, Mischa; Dehoust, Günter; Schüler, Doris (2008a): Comparative Life Cycle Assessment of various Cup Systems for the Selling of Drinks at Events. Focussing on major events such as the European Football Championships UEFA EURO 2008(TM) in Austria and Switzerland as well as the German "Bundesliga". Österreichisches Ökologie-Institut; Carbotech AG; Öko-Institut e.V. Deutschland. Online verfügbar unter http://www.meucopoeco.com.br/environmental_study.pdf.

Pladerer, Christian; Meissner, Markus; Dinkel, Fredy; Zschokke, Mischa; Dehoust, Günter; Schüler, Doris (2008b): Comparative Life Cycle Assessment of various Cup Systems for the Selling of Drinks at Events. Focussing on major events such as the European Football Championships UEFA EURO 2008(TM) in Austria and Switzerland as well as the German "Bundesliga". Österreichisches Ökologie-Institut; Carbotech AG; Öko-Institut e.V. Deutschland. Online verfügbar unter http://www.meucopoeco.com.br/environmental_study.pdf.

Plastic Recyclers Europe (2024): Recyclability Evaluation Protocol. Hg. v. Plastic Recyclers Europe.

Potting, José; van der Harst, Eugenie (2015): Facility arrangements and the environmental performance of disposable and reusable cups. In: *Int J Life Cycle Assess* 20 (8), S. 1143–1154. DOI: 10.1007/s11367-015-0914-7.

Rasines, Laura; San Miguel, Guillermo; Corona, Blanca; Aguayo, Encarna (2024): Addressing the circularity and sustainability of different single-use and reusable crates used for fresh fruit and

vegetables packaging. In: *Food Packaging and Shelf Life* 46, S. 101391. DOI: 10.1016/j.fpsl.2024.101391.

Ravishankar, Kartik; Ramesh, Praneeth Srivanth; Sadhasivam, Balaji; Raghavachari, Dhamodharan (2018): Wear-induced mechanical degradation of plastics by low-energy wet-grinding. In: *Polymer Degradation and Stability* 158, S. 212–219. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2018.10.026.

ReCup (2025): RECUP – die Mehrwegbecher für die Gastronomie. Online verfügbar unter https://recup.de/mehrwegbecher/?utm_term=mehrweg%20becher&utm_campaign=S-DE-RECUP-Specific&utm_source=adwords&utm_medium=ppc&hsa_acc=5205217405&hsa_cam=18562184598&hsa_grp=140122120217&hsa_ad=627400322070&hsa_src=g&hsa_tgt=kwd-313868878290&hsa_kw=mehrweg%20becher&hsa_mt=p&hsa_net=adwords&hsa_ver=3&gad_source=1&gad_campaignid=18562184598&gclid=Cj0KCQjwrojHBhDdARIsAJdEJ_fZYGjUA5qBm66wXVXlxQD_7oSokAGliDn2SFVGQu_hUJYFe7o91BYaAkkZEALw_wcB, zuletzt geprüft am 05.10.2025.

Recycling Today (2025): What Is a Plastic Washing System? How It Works. Online verfügbar unter <https://www.recyclingtoday.org/blogs/news/what-is-a-plastic-washing-system-how-it-works#:~:text=2>, zuletzt geprüft am 10.06.2025.

Roosen, Martijn; Harinck, Lies; Ügdüler, Sibel; Somer, Tobias de; Hucks, Amaury-Gauvain; Belé, Tiago G. A. et al. (2022): Deodorization of post-consumer plastic waste fractions: A comparison of different washing media. In: *The Science of the total environment* 812, S. 152467.

Schaich, Dirk (29.01.2025): Befragung und Datensammlung zu Spülpraxis von Mehrwegbechern im Zuge der Studie »Wash-Reuse« im Auftrag der Stiftung Initiative Mehrweg. geführt von Bertling, Jürgen; Blömer, Jan. Voerde.

Schill, Raphael (2025): Detailergebnisse der Verpackungsstudie präziSort im Bereich To-Go-Getränkebecher, 23.07.2025. E-Mail an Lena Bersch.

Schmid, Petra; Welle, Frank (2020): Chemical Migration from Beverage Packaging Materials—A Review. In: *Beverages* 6 (2), S. 37.

Schyns, Zoé O. G.; Shaver, Michael P. (2021): Mechanical Recycling of Packaging Plastics: A Review. In: *Macromolecular rapid communications* 42 (3), e2000415. DOI: 10.1002/marc.202000415.

Shen, Xiaoning; Hed, Yvonne; Annfinsen, Steffen; Singh, Naveen; Anwar, Hany; Mylvaganam, Bavan et al. (2025): Investigating Polyethylene Terephthalate Beverage Packaging: Impact of Recycled Content on Acetaldehyde, Benzene, and Other Contaminants. In: *J Polym Environ* 33 (5), S. 2362–2370. DOI: 10.1007/s10924-025-03544-1.

Sobhani, Zahra; Palanisami, Thava (2025): Emerging contaminants in organic recycling: Role of paper and pulp packaging. In: *Resources, Conservation and Recycling* 215, S. 108070.

Sphera (2025): LCA for Experts / MLC Database: Sphera. Online verfügbar unter www.sphera.com.

Stora Enso (2025): Cupforma Natura PE. Online verfügbar unter https://www.storaenso.com/-/media/documents/download-center/documents/product-specifications/paperboard-materials/cupforma-natura-pe-15-us.pdf?utm_source=chatgpt.com, zuletzt geprüft am 03.10.2025.

Straková, Jitka; Schneider, Julie; Cingotti, Natacha (2021): Throwaway Packaging, Forever Chemicals. European wide survey of PFAS in disposable food packaging and tableware. CHEM Trust; BUND; HEAL; Tegengif; Générations Futures; Arnika Association; IPEN; Danish Consumer Council.

Online verfügbar unter https://chemtrust.org/wp-content/uploads/PFASreport_FCM_May2021.pdf, zuletzt geprüft am 11.07.2025.

Swinnerton, S.; Su, J.; Tsai, Candace S. J. (2024): The emission and physicochemical properties of airborne microplastics and nanoplastics generated during the mechanical recycling of plastic via shredding. In: *Scientific reports* 14 (1), S. 24755. DOI: 10.1038/s41598-024-73775-0.

UBA (2025): Recyclingpapier ist gut für die Umwelt. Hg. v. Umweltbundesamt. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/umwelttipps-fuer-den-alltag/haushalt-wohnen/papier-recyclingpapier#undefined>, zuletzt aktualisiert am 20.08.2025, zuletzt geprüft am 22.08.2025.

Uekert, Taylor; Singh, Avantika; DesVeaux, Jason S.; Ghosh, Tapajyoti; Bhatt, Arpit; Yadav, Geetanjali et al. (2023): Technical, Economic, and Environmental Comparison of Closed-Loop Recycling Technologies for Common Plastics. In: *ACS Sustainable Chem. Eng.* 11 (3), S. 965–978.

Umweltbundesamt (2025): Einsatz von PFAS in der Papierindustrie. UBA. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/einsatz-von-pfas-in-der-papierindustrie>, zuletzt aktualisiert am 10.07.2025, zuletzt geprüft am 10.07.2025.

Umweltbundesamt (Hg.) (2024): Altpapier. Hg. v. Umweltbundesamt. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/daten/ressourcen-abfall/verwertung-entsorgung-ausgewaehlter-abfallarten/altpapier#vom-papier-zum-altpapier>, zuletzt geprüft am 23.07.2025.

Utopia (2023): Coffee-to-go: Wo du den Becher jetzt am Automaten zurückgeben kannst, zuletzt geprüft am 17.09.2025.

VerpackG (2021): Gesetz über das Inverkehrbringen, die Rücknahme und die hochwertige Verwertung von Verpackungen. VerpackG, vom zuletzt geändert durch Artikel 2 G. v. 22.09.2021 BGBl. I S. 4363. Online verfügbar unter <https://www.gesetze-im-internet.de/verpackg/VerpackG.pdf>, zuletzt geprüft am 31.01.2022.

Wacker, Stephan (2024a): Ab Januar bei Lidl: Joghurtbecher aus mechanisch recyceltem Polystyrol. Online verfügbar unter <https://320grad.de/2024/12/22/ab-januar-bei-lidl-joghurtbecher-aus-mechanisch-recyceltem-polystyrol/>, zuletzt aktualisiert am 13.01.2025, zuletzt geprüft am 15.01.2025.

Wacker, Stephan (2024b): EU-Verpackungs-verordnung: Stimmen zur Einigung. Hg. v. 320° - Deutschlands Online-Magazin für die Circular Economy. 320° - Deutschlands Online-Magazin für die Circular Economy. Online verfügbar unter <https://320grad.de/2024/03/05/eu-verpackungs-verordnung-stimmen-zur-einigung/>, zuletzt aktualisiert am 26.04.2024, zuletzt geprüft am 11.07.2025.

WestRock (2025): Fold-Pak®: Verpackungslösungen für unterwegs und zum Mitnehmen. Nachhaltigkeit und Leistung für unterwegs. Online verfügbar unter https://de.westrock.com/products/folding-cartons/fold-pak-to-go-packaging?utm_source=chatgpt.com, zuletzt geprüft am 03.10.2025.

Yadav, Pooja; Silvenius, Frans; Katajajuuri, Juha-Matti; Leinonen, Ilkka (2024): Life cycle assessment of reusable plastic food packaging. In: *Journal of Cleaner Production* 448, S. 141529. DOI: 10.1016/j.jclepro.2024.141529.

Zimmermann, Lisa; Dierkes, Georg; Ternes, Thomas A.; Völker, Carolin; Wagner, Martin (2019): Benchmarking the in Vitro Toxicity and Chemical Composition of Plastic Consumer Products. In: *Environmental Science & Technology* 53 (19), S. 11467–11477.