

07.21

Müll und Abfall

53. Jahrgang
Juli 2021
Seite 349-416

www.MUELLundABFALL.de

Fachzeitschrift
für Kreislauf-
und Ressourcen-
wirtschaft

© Copyright Erich Schmidt Verlag GmbH & Co. KG, Berlin 2021 (<http://www.muellundabfall.de>) - 04.10.2021 11:11



UMWELTdigital – Premium Umweltrecht für Unternehmen und Verwaltung

Herausgegeben vom Erich Schmidt Verlag
Datenbank, inkl. Infodienst zu allen Aktualisierungen mit jedem Update

www.UMWELTdigital.de/info

„Tracer-Based-Sorting“ in der Verpackungs-Abfallwirtschaft

Tracer-Based-Sorting in packaging waste management

J. Woidasky, M. Auer, J. Schmidt, A. Kusch, J. Gasde, C. Lang-Koetz, S. Wiethoff,
I. Sander, A. Schau, B. S. Richards, A. Turshatov, D. Busko, A. Treick,
P. Wendler, D. Kirchenbauer, D. Wacker, F. Fuchs, J. Moesslein

Zusammenfassung

Tracer-Based-Sorting ist ein innovativer Ansatz für Erkennungs- und Sortierschritte in der Abfallwirtschaft, der die Sortierung von Materialien oder Produkten unabhängig von deren physikalischen Eigenschaften ermöglicht. Die Technologie nutzt dabei anorganische Fluoreszenz-Marker in ppm-Konzentrationen. Diese Substanzen werden im Sortierprozess detektiert und ermöglichen so die gezielte Vorsortierung und nachfolgende Aufbereitung zu hochwertigen Rezyklaten. Fünf deutsche Unternehmen sowie zwei Hochschulen und ein assoziierter Netzwerkpartner haben im Rahmen eines durch das BMBF geförderten Forschungsvorhabens diesen Ansatz für Leichtverpackungen entwickelt und dessen Anwendung demonstriert.

Abstract

Tracer-Based-Sorting is an innovative approach to waste detection and sorting. It enables the sorting of materials or products regardless of their physical properties. The technology uses inorganic fluorescent markers in ppm concentrations. These substances are detected in the sorting process and thus enable targeted pre-sorting and subsequent processing into high-quality recyclates. Five German companies as well as two universities and one associated network partner have developed this approach for light-weight packaging and demonstrated its application as part of a BMBF-funded research project.

1. Einleitung

Bereits seit Jahren steigen die Kunststoffabfallmengen in Deutschland stark an. Waren es im Jahr 1991 noch 1,6 Mio. t, so wurden 2018 bereits 3,2 Mio. t erzeugt [1], obwohl im fast gleichen Zeitraum die mittlere Masse der Kunststoffverpackungen um 25 % gesunken ist [2]. Um steigenden Verpackungszahlen und -mengen zu begegnen, fordert die EU-Verpackungsrichtlinie eine Recyclingquote ab 2025 von 50 bzw. ab 2030 von 55 % [3]. Im deutschen Verpackungsgesetz wird die Quote auf 63 % ab 2022 verschärft [4]. 2017 wurden lediglich 48,6 % der Kunststoffverpackungen in Deutschland aus Sortieranlagen an Recyclingbetriebe geliefert. Die tatsächliche Menge des daraus hergestellten hochwertigen Rezyklats ist jedoch geringer, da bei der Verwertung der sortierten Kunststofffraktionen in der Recyclinganlage mit einem Massenver-

lust von bis zu 35 % zu rechnen ist [5]. Um diese Situation der werkstofflichen Verwertung zu verbessern, besteht ein deutlicher Handlungsbedarf bei der Optimierung der Sortiertechnik. Bisher befinden sich aus technischen und wirtschaftlichen Gründen in den Sortieranlagen erzeugten Kunststofffraktionen Störstoffe und Fremdmaterialien [5], die zu Qualitätseinbußen bei der Rezyklatherstellung führen. Oft erreicht die aktuelle Sortiertechnik basierend auf der Nahinfrarot (NIR)-Spektroskopie angesichts der Weiterentwicklung der Verpackungs- und Werkstofftechnik ihre Grenzen, so dass praxisrelevante Trennaufgaben wie z. B. die Abtrennung unterschiedlicher Typen einer Kunststoffsorte (wie z. B. Homo- versus Copolymere oder Extrusions- versus Spritzgusstypen), die Separierung identischer Packstoffe nach ihren Füllgütern (z. B. Food versus Nonfood) oder die Abtrennung von Packstoffen mit kreislaufeinschränkenden Merkmalen, wie z. B. Mehrschichtsystemen, nicht möglich ist [6]. Im Ergebnis entsteht so ein deutlicher Handlungsbedarf, um die steigenden Anforderungen ab 2022 erfüllen zu können.

2. Forschungsprojekt „Marek“

Im durch das BMBF geförderten Verbundforschungsprojekt „Markerbasiertes Sortier- und Recyclingsystem für Kunststoffverpackungen (MaReK)“ arbeiten sieben Partner unter der Leitung des Instituts für Industrial Ecology (INEC) der Hochschule Pforzheim zusammen. In dieser Partnerschaft forschten die deutschen Unternehmen Polysecure GmbH (Freiburg), Werner & Mertz GmbH (Mainz), Der Grüne Punkt – Duales System Deutschland GmbH (Köln) und das Karlsruher Institut für Technologie (KIT) mit dem Ziel, den abfallwirtschaftlichen Einsatz anorganischer Fluoreszenz-Marker zu untersuchen, um so die Kreislaufführung von Verpackungen zu verbessern. Als assoziierter Netzwerkpartner wirkte die Umwelttechnik BW GmbH (Stuttgart) an dem Vorhaben mit.

3. Stand der Technik

In Deutschland werden Leichtverpackungen haushaltsnah im Rahmen Dualer Systeme getrennt von anderen Abfallströmen gesammelt, in derzeit 62 Sortieranlagen [7] gemäß den Sortierspezifikationen der Dualen

J. Woidasky, M. Auer, J. Schmidt, A. Kusch, J. Gasde, C. Lang-Koetz
Hochschule Pforzheim,
Pforzheim, Germany

S. Wiethoff
Der Grüne Punkt –
Duales System
Deutschland GmbH,
Köln, Germany

I. Sander, A. Schau
Werner & Mertz GmbH,
Mainz, Germany

B. S. Richards, A. Turshatov, D. Busko
Karlsruhe Institute for
Technology, Karlsruhe,
Germany

F. Sorg
Umwelttechnik
BW GmbH,
Stuttgart, Germany

A. Treick, P. Wendler, D. Kirchenbauer, D. Wacker, F. Fuchs, J. Moesslein
Polysecure GmbH,
Freiburg, Germany

Systeme [8] separiert und anschließend in Recyclinganlagen verwertet. Die so unter industriellen Bedingungen erhaltenen Kunststoff-Rezyklate weisen Einschränkungen in Farbe, Geruch und mechanischen Eigenschaften durch Polymerabbau, Verunreinigungen und unmischbare Anteile auf [9], so dass sie lediglich eingeschränkt und meist aus technischen und rechtlichen Gründen nicht für den Ursprungszweck wieder eingesetzt werden können. Der Anlageninput ergibt sich aus dem Verbraucherverhalten und kann daher praktisch nicht gesteuert werden. Daher führt die Gewinnung sehr hochwertiger Rezyklatfraktionen nicht nur zu sehr hohem technischem und wirtschaftlichem Aufwand, sondern hat gleichzeitig möglicherweise negative Auswirkungen auf die erreichbare Gesamt-Verwertungsquote der Leichtverpackungen. Die für die Sortierung heute verwendeten NIR-Sorter, von denen bis zu etwa 50 in Anlagen für Durchsätze von mehreren hunderttausend Jahrestonnen eingesetzt werden, sind in ihrer Erkennungsgenauigkeit u. a. durch übereinanderliegende, schwarze, verschmutzte, nasse oder intensiv bedruckte Verpackungsoberflächen eingeschränkt. Eine weitere zentrale Einschränkung ist die ausschließliche Nutzung verpackungsinhärenter, auf die Erkennung der Hauptpolymere beschränkter Trennmerkmale, so dass derzeit Verbesserungen durch eine Kombination bestehender Ansätze mit Bilderkennung oder die Nutzung zusätzlicher Trennmerkmale durch Etiketten oder Packstoffmodifikationen untersucht werden. So konnten bereits Herausforderungen, wie die Erkennung schwarzer Kunststoffe [10] oder unverwertbarer Silikonkartuschen aus Polyethylen (PE), gelöst werden. Dennoch bleiben Werkstoffverbunde, wie z. B. Verbunde aus Polyethylenterephthalat und Polyamiden in Getränkeflaschen oder flexible Mehrschicht-Verbundverpackungen mit bestehenden spektroskopischen Verfahren nicht erkenn- oder abtrennbar.

4. Zusätzliches Trennmerkmal durch Lumineszenz-Marker

Durch den Einsatz anorganischer Fluoreszenz-Tracer können Verpackungen mit einem zusätzlichen, frei zuweisbaren Trennmerkmal ausgestattet werden. Diese „Tracer-Based-Sorting“ (TBS)-Technologie ermöglicht neue Sortier- und Verwertungsansätze in der Abfall-

wirtschaft. Der von TBS verwendete Ansatz ist u. a. die „Anti-Stokes“- oder Upconversion (UC)-Fluoreszenz. Bei diesem physikalischen Effekt ist die Anregungswellenlänge länger (energieärmer) als die Emissions- bzw. Fluoreszenzwellenlänge. Obwohl die Effizienz im einstelligen Prozentbereich liegt, bietet die UC-Lumineszenz durch eine sehr enge Wellenlängenverteilung des Signals und vor allem durch die Abwesenheit von unerwünschten Hintergrund-Signalen einen sehr guten Ansatz zur Detektion und Sortierung.

Die hierbei zur Sortierung verwendete Anregungswellenlänge von 980 nm liegt für den Menschen im nicht sichtbaren Bereich des Lichtspektrums, während die Fluoreszenz in Form von sichtbarem Licht auftritt. Es kommen eigens synthetisierte Tracer-Materialien zum Einsatz. Sie weisen eine hohe Quanteneffizienz auf, so dass in nicht-rußgefüllten Kunststoffen eine Konzentration von 1-10 ppm ausreicht, um diese während des Sortierprozesses detektieren zu können. Während des konventionellen Gebrauchszyklus sind die Fluoreszenz-Tracer völlig unsichtbar und emittieren im Gegensatz zu organischen und konventionellen Leuchtstoffen kein Licht. Für den Sortierprozess werden industrielle Anregungsquellen (z. B. Laserdioden oder LED) und Detektionssysteme (z. B. Fotodioden, Kameras) eingesetzt. Anregung und Detektion dauern nur Millisekunden und erfolgen in einem zerstörungsfreien Verfahren.

Das Fluoreszenz-Signal der Tracer ist materialspezifisch und weist spezifische, klar abgegrenzte Signale im grünen (Tracer 1), roten (Tracer 2) und im infraroten (Tracer 3) Bereich des Spektrums auf (Abbildung 1b). Die Kombination dieser drei Tracer ermöglicht zahlreiche Sortiercodes (bis zu 40), die jeweils an die Anzahl der gewünschten Fraktionen eines Abfallstroms angepasst werden kann.

Untersuchungen zur Toxizität in Vorbereitung auf eine Zulassung für die EFSA-Positivliste stehen derzeit kurz vor dem positiven Abschluss.

5. TBS-Kennzeichnung von Verpackungen

Der Tracer-Einsatz ist sowohl im Packstoff, im Etikett als auch über Druck auf der Verpackung oder dem Etikett möglich.

Zur Beurteilung der Marker-Funktion in einer Polymermatrix wurden Kunststoff-Filme und Kunststoff-

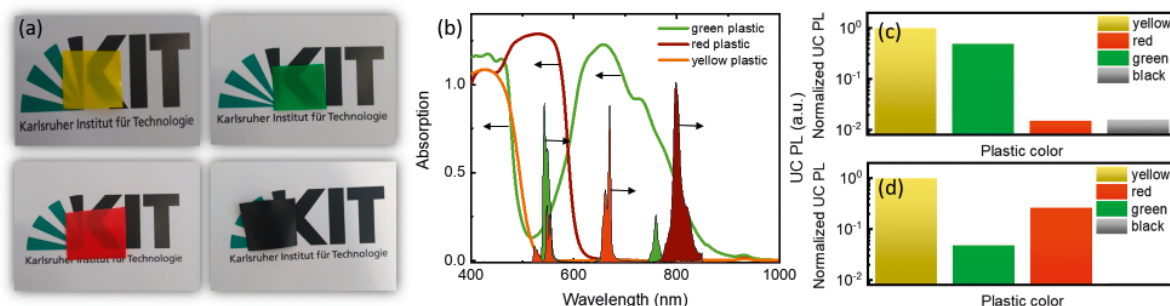
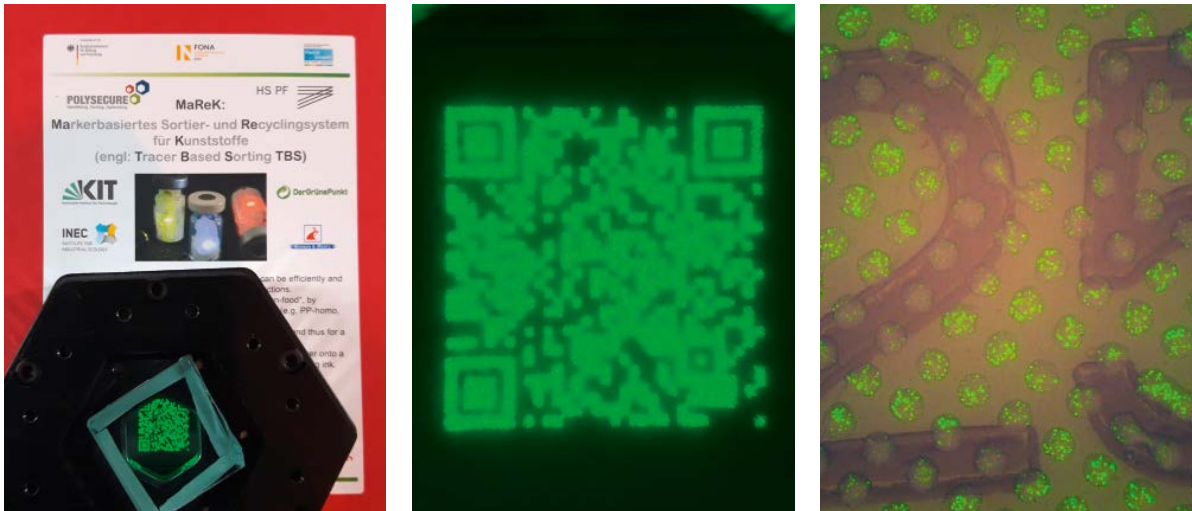


Abbildung 1

Analyse von Polymerfilmen mit dispergierten UC-Markern. (a) Fotos von halbdurchsichtigen Polymerfilmen mit dispergierten UC-Markern; (b) Normalisierte UC-Lumineszenz von Markern und Absorptionsspektren von Polymerfilmen; Normalisierte UC-Lumineszenz von grünen (c) und roten (d) Peaks (die für den gelben Kunststoff gemessene Intensität wird als 1 gemessen für die Kunststoffe mit 1000 ppm Konzentration des Markers genommen). Zu beachten ist die logarithmische Skala der Intensität.



Abbildungen 2a, 2b und 2c
Etikettendruck-Muster. Links: Offset-Etikettenmuster auf Papier. Mitte: Im Flexodruck erstellter QR-Code unter Laseranregung. Rechts: Mikroskop-Aufnahme des gedruckten Farbauftrages mit den Marker-Partikeln (Druckpunkt-Durchmesser von 100-110 µm).

Flaschen in verschiedenen Farben hergestellt, welche einen im Grundmaterial homogen verteilten Fluoreszenz-Marker enthalten. Abbildung 1 zeigt die Analyseergebnisse des Fluoreszenzsignals in PE-Folien [11]. Der eingesetzte Fluoreszenz-Marker zeigt bei Anregung im infraroten Spektralbereich durch einen UC-Prozess Emissionen im grünen und roten Spektralbereich. Bei den Kunststoff-Filmen wurden zwei unterschiedlichen Schichtdicken getestet. Die sichtbare UC-Emission der Marker kann durch das als Träger für die Marker verwendete Polymermaterial gestört werden, da das Polymer z. B. Pigmente oder andere optisch aktive Additive enthält (s. Abbildung 1c und d).

Daher war es wichtig zu untersuchen, wie die Polymerschicht die UC-Emission modifiziert. Abbildung 1b zeigt die UC-Spektren des in halbtransparenten Kunststofffolien dispergierten Markers. Diese UC-Spektren zeigen charakteristische Peaks bei 540 nm, 670 nm und 810 nm. Alle untersuchten Kunststoffe besitzen nur eine schwache NIR-Absorption (> 900 nm). Somit können in den Polymerfilmen dispergierte UC-Marker mit unterschiedlichen Farbpigmenten gleichermaßen mittels 980 nm Laser angeregt werden. Allerdings können die Pigmente die emittierten Photonen unterschiedlich absorbieren, was sich auf die Intensität der UC-Fluoreszenz auswirkt. Der gelbe halbtransparente Kunststoff zeigt eine starke Absorption bei < 500 nm und hat somit einen sehr geringen Einfluss auf das UC-Signal (ähnlich wie beim weißen halbtransparenten Kunststoff). In diesem Fall wird die maximale UC-Fluoreszenz-Intensität der grünen, roten- und NIR-Peaks erreicht (s. Abbildung 1c und d).

Grundsätzlich sind die Druckverfahren des Offset-, Flexo- und des Siebdrucks gut geeignet zur Aufbringung von TBS-Markern auf Etiketten und Verpackung. Der Markereinsatz kann dabei völlig unabhängig von Design-Anforderungen an die Verpackung umgesetzt werden. Die Rahmenbedingungen des Einsatzes der Partikel (bei einer Partikelgröße von 2 bis 6 µm größte Leuchtstärke; Dichte von 3 bis 8 g/cm³ führt schnell zu Sedimentation) zeigten sich in praktischen Versuchen als gut beherrschbar. Die Druckergebnisse waren mit

allen Verfahren technisch einwandfrei und gut identifizierbar (Abbildung 2).

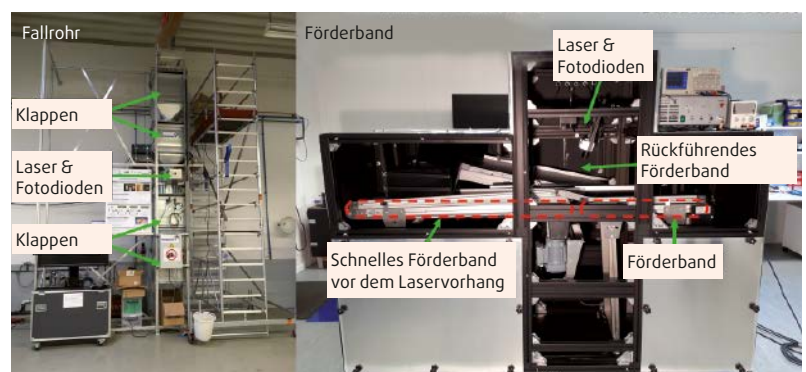
Es wurden erfolgreich Papier- und PE-Selbstklebetiketten und auch starre PE-Packmittel direkt bedruckt. Die Tracer wurden in konventionelle Drucktinten gemischt, so dass der gewünschte TBS-Sortiercode ohne weitere technische Änderungen des Druckprozesses auf die Verpackung gebracht wurde. Auch ist die Druckfarbe mit Marker mit bloßem Auge nicht von normaler Druckfarbe zu unterscheiden und eignet sich daher neben der Sortierung hervorragend als Sicherheitsmerkmal zur Authentifizierung und Identifizierung.

Ein weiterer entscheidender Vorteil der Tracer-Aufbringung über bedruckte Etiketten ist, dass die Tracer durch die bewährten Verfahren der Etikettenentfernung im Recyclingprozess vollständig von den Verpackungen entfernt werden und es so zu keiner Tracer-Verschleppung in Rezyklate kommen kann.

6. TBS-Sortiereinrichtungen

Sortierversuche mit TBS-Markern erfolgten sowohl auf Pilot-Versuchsanlagen als auch auf einem industriellen NIR-Sorter, der lediglich um eine TBS-Anregungsleiste ergänzt wurde. Für die Detektion und Auswertung der Messdaten auf der Industrieanlage war keine Ergänzung erforderlich. Als Pilot-Sortieranlagen

Abbildung 3
Mechanischer Aufbau der Detektionseinheit. Links: Fallrohr. Rechts: Förderbänder mit Rundlauf.



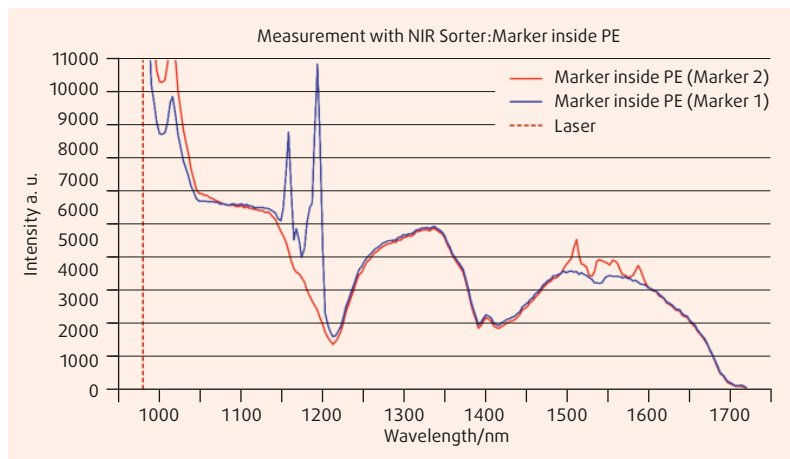


Abbildung 4
Messung im NIR
Sorter: PE-Spektrum
mit Marker 1 und
Marker 2.

wurde sowohl eine Fallrohr-Anordnung als auch ein Förderband-Konzept realisiert (Abbildung 3).

Das Fallrohr ist für Objekte mit Kantenlängen bis zu 300 mm geeignet und sieht eine Rundumerkennung der Objekte in der Detektionszone in der Mitte des Rohres vor, die durch drei sternförmig horizontal angeordnete Laser-Anregungseinheiten und drei Detektionseinheiten gebildet wird. Die Detektionszone ist durch optische Schleusen von der Umgebung getrennt. Die Objekte fallen vereinzelt durch ein Rohr und werden rundherum detektiert. Bedingt durch die Schleusen beträgt der Durchsatz mit diesem Aufbau 0,5 Teile/Sekunde.

Die Technikums-Anlage mit horizontaler Detektionseinheit und Förderbändern ermöglicht Bandgeschwindigkeiten von 3 m/s und einen Durchsatz von bis zu 10 Einheiten pro Sekunde. Die Verpackungen werden durch einen vertikalen Laservorhang geführt, um die Bedingungen in LVP-Sortieranlagen abzubilden. Die Anlage ist strahlungsdicht und so konstruiert, dass eine Vereinzlung vor- und eine Ablage nachgeschaltet werden könnte. In diesen Anlagen wurde praktisch zu 100 % eine korrekte Detektion der Verpackungen erreicht.

Für die Sortierversuche mit konventionellen NIR-Sortern wurde eine Laseranregungs-Optik in einen NIR-Sorter „Unisort“ der Fa. Steinert integriert. Die Erkennung und Auswertung der Tracer-Signale erfolgte mit Hilfe der bestehenden Anlagensoftware ohne Erweiterungen. Die Laseroptik wurde so eingestellt, dass der Strichfokus des Lasers im Messbereich der für die NIR-Erkennung der Reflektionsspektren genutzten anlagenseitigen Kamera lag. Die Detektions-

kamera wurde mit einem Filter vor der Laserstrahlung geschützt. Der Detektionsbereich dieser Kamera kann sowohl für die NIR-Erkennung als auch für die TBS-Detektion verwendet werden. Abbildung 4 zeigt die Messsignale des NIR-Sorters einer Polyethylen-Probe mit zwei verschiedenen Markern. Die Kamera detektiert dabei die Superposition von Reflektions- und Fluoreszenzspektren, wobei die engen Fluoreszenzlinien gut von der breitbandigen NIR-Reflektion unterschieden werden können.

Die deutlich zu erkennenden Marker-Signale führen im NIR-Sorter praktisch zu vollständiger Detektion. Für die Ausbringung ist dann entscheidend, dass der zur Abtrennung ausgelöste Druckluftstoß hinreichend genau auf die Verpackung ausgerichtet werden kann. Für die Versuche wurden leere Duschgefäße aus PE-HD auf der Vorder- und Rückseite jeweils mit TBS-Markierungen (20x60 mm, Markerkonzentration 200 µg/cm²) präpariert und bei einer Bandgeschwindigkeit von 3 m/sec allein oder als Teil einer Mischung mit Polyolefin-Hohlkörpern (insgesamt 5,2 kg, davon 0,3 kg Folien und 2,3 kg TBS-markierte Flaschen) identifiziert.

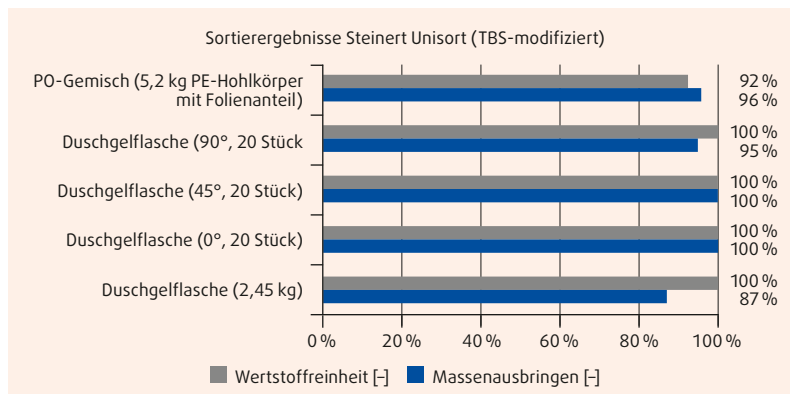
Bereits bei den ersten Versuchen ohne Optimierung der Sortieranlage und der Tracer-Anbringung wurden Ausbringungsraten zwischen 87 und 100 % erzielt. Die Produktreinheiten lagen zwischen 92 und 100 %. Bei den Versuchen „Duschgefäß 0°/45°/90°“ (Abbildung 5) wurden ausschließlich Flaschen einzeln in ihrer Längsachse in Bewegungsrichtung des Bandes (Markierung „0°“, schräg „45°“) oder quer („90°“) zur Bewegungsrichtung auf das Sortierband aufgelegt. Die optische Erkennung und Identifikation war jeweils vollständig, jedoch führte die Abtrennung durch das Druckluft-Düsen-system der Anlage im Fall „90°“ lediglich zu einer mittleren Ausbringungsrate von 95 %. Der Verlust von 5 % ist hier ausschließlich auf den Ausblasprozess, nicht auf den Identifikationsprozess zurückzuführen. Ähnliche Effekte verminderter Ausbringung durch geometrische Rahmenbedingungen sind auch bei der Trennung runder bzw. rollender Objekte bekannt.

7. Stoffstromanalyse und Ökobilanzierung

Die Grundlage für Wirtschaftlichkeits- und Umweltanalysen bildete eine deutschlandweite Erfassung und detaillierte Charakterisierung von Leichtverpackungsabfällen aus 216 Haushalten, die über zwei Wochen in einem Zeitraum im Juli und August 2019 anfielen. Hierbei wurden neben den Massen, Typen und Werkstoffen der Packmittel u. a. die Etiketten- und Verschlussvarianten, die Farben, Füllgut-Typen und die Lagerungsanforderungen, Verunreinigungsgrade sowie Größen der Packmittel erfasst und alle Objekte fotografiert. Die Untersuchung umfasste insgesamt 27.394 Teile mit einer Gesamtmasse von ca. 207 kg. Abbildung 6 zeigt zentrale Ergebnisse dieser Untersuchung.

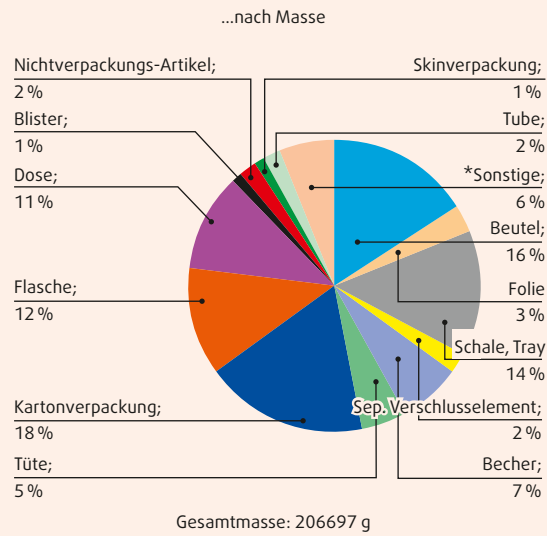
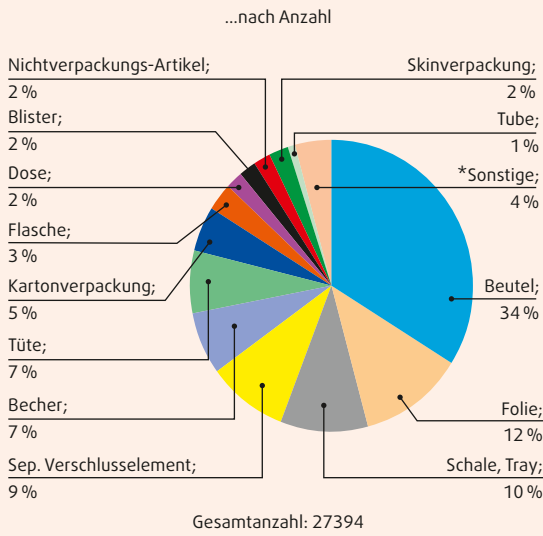
Die Verpackungscharakterisierung bildete gemeinsam mit Literaturdaten und Experteninterviews die Basis für eine Umweltbewertung des TBS-Ansatzes. Dazu wurde ein Energie- und Stoffstrommodell der Sortierung und Verwertung von LVP entwickelt, das die Grundlage zur Erstellung einer Sachbilanz für die

Abbildung 5
TBS-Sortierergebnisse
auf Steinert-Unisort-
NIR-Sorter (TBS-modifiziert).



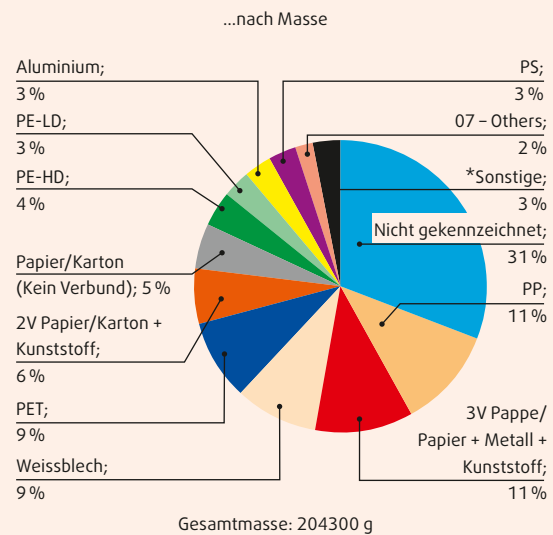
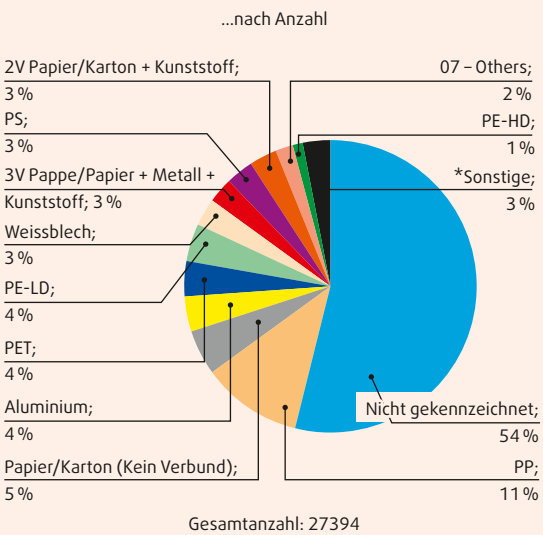
Abbildungen 6a, 6b und 6c
Ergebnisse der deutschlandweiten Studie zur Verpackungs-Detail-Charakterisierung.

Sortierergebnisse – Verpackungsarten



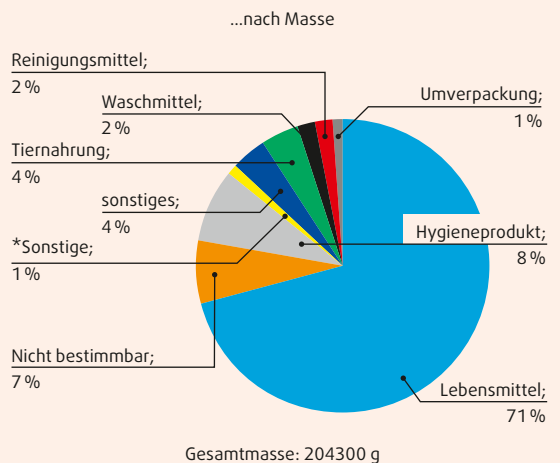
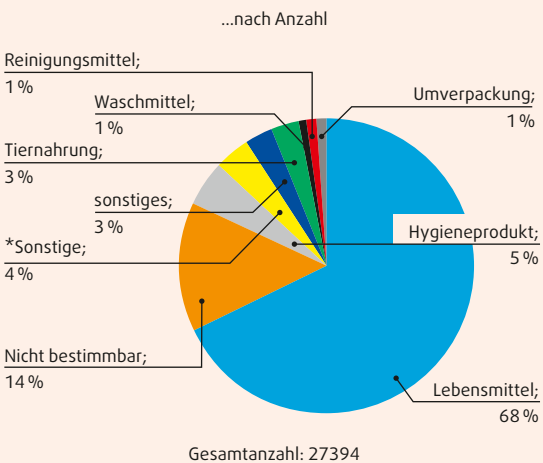
*Sonstige: Verschraubter Tiegel, Wickelverpackung, Füllmaterial, Starre Folie, Sonstige Verpackungen, Schachtel, Restliche Kleinteile und Netz

Sortierergebnisse – Packstoff-Hauptwerkstoff



*PVC-Hart, PVC-P, PMMA, PLA, PA, Kunststoff+Papier/Pappe unlaminier, 2V Kunststoff+Aluminium und 2V Aluminium+Papier/pappe

Sortierergebnisse – Füllguttyp



*Sonstige: Medikamente, Haushaltsfolie, Medizinprodukte

ökologische Bewertung bildete und die LVP-Sortierung sowie die werkstoffliche Verwertung, die Aufbereitung zu Ersatzbrennstoff (EBS) sowie die Aufbereitung zu Sekundärzellstoff abbildete. Auf dieser Basis wurden drei Szenarien modelliert und bewertet: (1) das derzeit bestehende (konventionelle) Sortier- und Recyclingsystem, (2) die Anwendung von „TBS light“ (Nachsortierung bestehender LVP-Fractionen zum Erreichen einer höheren Produktqualität) und (3) die Umsetzung von „TBS complete“ (weitgehende Substitution der bisherigen Anlagentechnik in Sortieranlagen durch eine TBS-Sortierung). Bei „TBS complete“ wurde zudem das Potential zur Erhöhung des Anteils der werkstofflichen Verwertung in den Teilszenarien 10, 50, 90 und 100 abgebildet. Zum Beispiel modelliert „TBS complete 10“, dass 10 % der zuvor (im konventionellen System) als Ersatzbrennstoff verwerteten Polymere stattdessen werkstofflich verwertet werden.

Abbildung 7 zeigt die Ergebnisse aller Szenarien bezüglich Klimaauswirkungen und Gutschriften der LVP-Sortierung und des Recyclings. Pro Mg LVP verursacht der konventionelle Sortierprozess 21,6 kg CO₂-eq und das Recycling 113,1 kg CO₂-eq. Der Hauptverursacher hierfür ist der Energiebedarf des Extrusionsprozesses (40,3 kg CO₂-eq). Diese Umweltbelastung wird durch Gutschriften (700,1 kg CO₂-eq) für die Regranulate mehr als ausgeglichen, die die Produkte der Primärproduktion ersetzen, so dass sich ein Saldo (Einsparung) von 565,4 kg CO₂-eq ergibt.

Bereits für das Szenario „TBS light“ zeigt sich im Vergleich zum konventionellen System eine positive Änderung der Klimaauswirkungen. Der Nettonutzen des Szenarios ist aufgrund der höheren Gutschriften für die TBS-Fractionen (712,8 kg CO₂-eq) etwas höher als beim konventionellen Sortierprozess (578,2 kg CO₂-eq). Die zusätzliche Belastung durch die TBS-Sortiereinheiten wird vollständig durch die vermiedene Klimawirkung des eingesparten Prozesses der manuellen Sortierung kompensiert.

Im Vergleich zum konventionellen und zum Szenario „TBS light“ zeigen die Szenarien des „TBS complete“ eine Erhöhung der sortierbedingten Klimawirkung um etwa 20 %. Je nach Steigerungsrate der werkstofflichen Verwertung steigen die Klimawirkungen des Recyclings (um 14 % beim „10“-Fall und bis zu 46 % beim „100“-Fall). Der Anstieg der Sortier- und Verwertungseffekte wird durch die Kohlenstoffgutschriften für das zusätzliche Sekundärmaterial sehr deutlich kompensiert: Der Nettonutzen von „TBS complete“ reicht von 783,9 kg CO₂-eq für die 10 %-Steige-

rung bis zu 1227,1 kg CO₂-eq für die 100 %-Steigerung und führt so zu einer deutlichen Umweltentlastung hinsichtlich der Klimawirkung.

8. Stakeholderanalyse im Innovationsprozess

Parallel zur Technikentwicklung wurde eine Untersuchung des Innovationsprozesses durchgeführt: Mittels eines Stakeholder-Mappings wurden Stakeholder-Gruppen identifiziert und deren Beziehungen untereinander analysiert [13], um ein Systemverständnis zu erlangen und die Entwicklungsdynamik gezielt beobachten und ggf. beeinflussen zu können. Die Ergebnisse für die Umsetzung des TBS-Ansatzes sind in Abbildung 8 dargestellt. Dabei wurden die Varianten der Markereinbringung in den Packstoff (Kennzeichnung durch Ziffer 1 in Abbildung 8), in den Etikettendruck (Ziffer 2) und in den Etikettenwerkstoff (Ziffer 3) berücksichtigt.

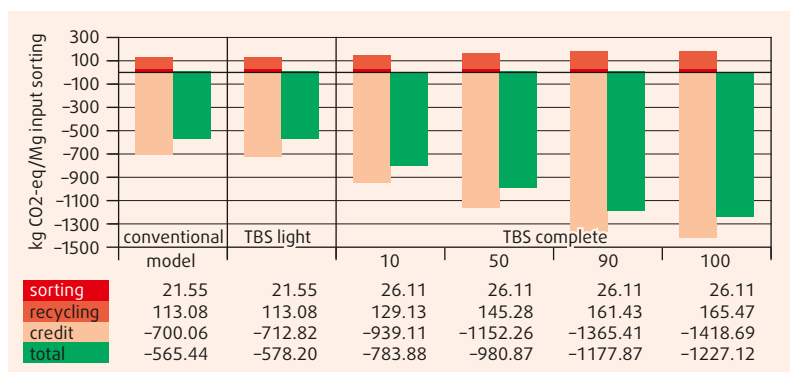
Über eine Einordnung in ein Interesse/Einfluss-Raster erfolgte eine Bewertung der Relevanz der Stakeholder-Gruppen. Daraus wurde abgeleitet, welche Stakeholder-Gruppen für den Dialog geeignet sind und wie mit der Kommunikation zu weiteren Stakeholder-Gruppen umzugehen ist. In Stakeholder-Workshops mit Vertretern der relevant bewerteten Stakeholder-Gruppen wurde die Technologie detailliert vorgestellt und diskutiert. Anschließend wurden Treiber und Hemmnisse aus der Stakeholder-Perspektive gemeinsam ermittelt und bewertet.

Hohe Rezyklatqualität ist die vorherrschende Treiberkategorie, während das Potenzial von TBS im Umgang mit komplexen Verpackungen und als Vermarktungschance zunehmend wichtig zu werden scheint. Die Herausforderungen bei der Umsetzung von TBS umfassen hauptsächlich regulatorische Bedenken (rechtliche Hürden & Qualität/Sicherheit) oder wirtschaftliche Unklarheiten (Wirtschaftlichkeit & Verteilung Aufwand/Nutzen). Das Anwendungsszenario für TBS zur Abtrennung von Lebensmittel- und Nicht-Lebensmittel-Verpackungen wurde durch die Stakeholder mit dem größten Potential bewertet. Darüber hinaus wurde das Szenario einer hersteller- bzw. brand-spezifischen TBS-Abtrennung als zwar attraktiv, jedoch in der Praxis schwer realisierbar bewertet. Generell wurde die Machbarkeit der Anwendungskonzepte von den teilnehmenden Recyclern besser bewertet als von den Inverkehrbringern und Verpackungsherstellern. Die Attraktivität der Anwendungskonzepte hingegen wurde von den Recyclern weniger positiv beurteilt als von anderen Stakeholder-Gruppen. Insgesamt zeigt sich, dass für grundlegende Innovationen in der Verpackungs-Abfallwirtschaft ein Multi-Stakeholder-Management erforderlich wird.

9. Zusammenfassung

Aufgrund gleichzeitig steigender Kunststoffverpackungs-Abfallmengen und der Verschärfung rechtlicher Anforderungen an die Verpackungsverwertung ist eine Fortentwicklung des derzeitigen Sortier- und Verwertungssystems erforderlich. Die Fortentwick-

Abbildung 7
Ergebnisse des Ökobilanz-Vergleichs der LVP-Entsorgung (konventionell, mit TBS-Nachsortierung „TBS light“, ausschließlich TBS-Anwendung, „TBS complete“) [12].



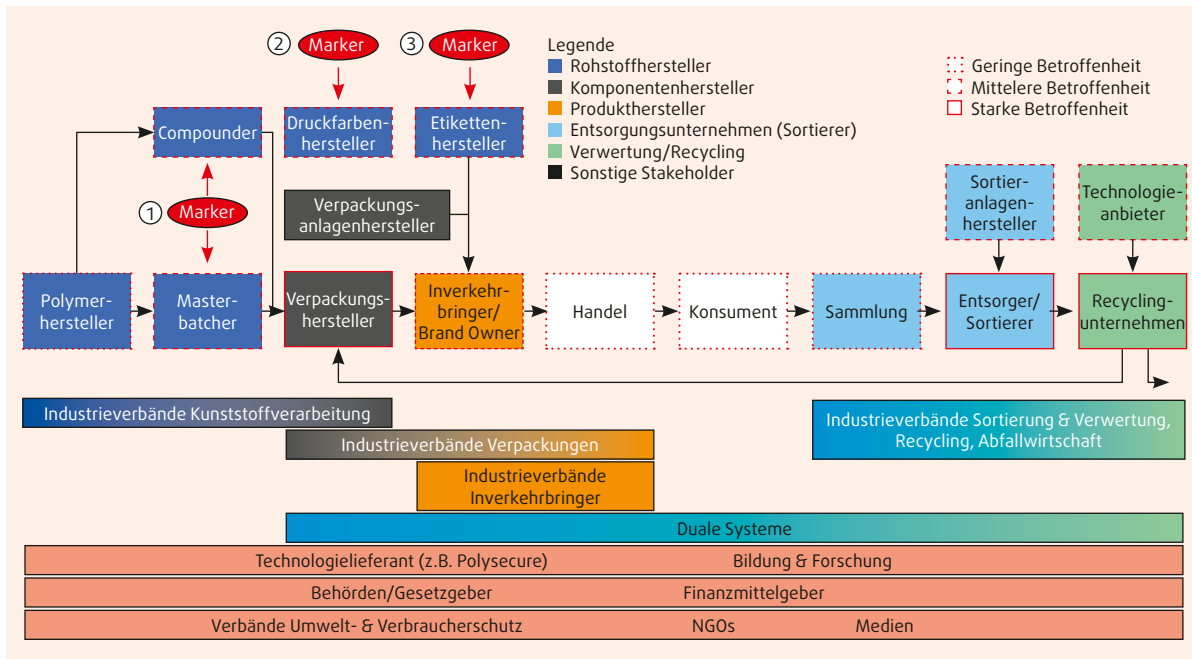


Abbildung 8
Stakeholder-Übersicht für den TBS-Ansatz [14].

lung der bestehenden Sortierverfahren (NIR-Sorter) ist durch die Beschränkung auf verpackungsinhärente Eigenschaften als Trennmerkmale beschränkt. Diese Beschränkung kann durch die Nutzung eines zusätzlich eingefügten, packmittelunabhängigen Trennmerkmals durch Fluoreszenz-Tracer aufgehoben werden: Durch den Ansatz des „Tracer-Based-Sorting“ (TBS) wird eine Identifikation und Trennung z. B. von Food- und Non-Food-Verpackungen oder die sichere Erkennung von Multilayer-Verpackungen möglich. Für die erfolgreiche Umsetzung einer solchen Innovation in der Verpackungs-Abfallwirtschaft ist die Einbeziehung zahlreicher Stakeholder erforderlich.

Der TBS-Ansatz wurde im Rahmen des vom BMBF im Zeitraum von 2017 bis 2020 geförderten Verbundforschungsprojekts „Markerbasiertes Sortier- und Recyclingsystem für Kunststoffverpackungen (MaReK)“ von insgesamt sieben Partnern für den Einsatz in der Abfallwirtschaft untersucht. Im Ergebnis wurden drei Markersubstanzen sowie ein Anwendungs-System zur verwertungsspezifischen Kennzeichnung zahlreicher Fraktionen entwickelt. Es kommen eigens synthetisierte Fluoreszenz-Tracer zum Einsatz. Sie weisen eine hohe Quanteneffizienz auf, so dass geringe Tracer-Mengen reichen (z.B. 1-10 ppm in nicht-rußgefüllten Kunststoffen). Anwendungsuntersuchungen zeigten die Stabilität der Marker auch bei mehrfacher Verarbeitung.

Die Sortiertechnik für markerhaltige Verpackungen wurde mehrstufig bis hin zur Integration in industrieübliche NIR-Sorter entwickelt und zeigte im Anwendungsversuch mit Ausbringungsraten über 87 % und Reinheiten bis 100 % sehr gute Ergebnisse.

Für die Umsetzung des TBS-Ansatzes wurde eine umfangreiche Charakterisierung des derzeitigen Leichtverpackungs-Anfalls durchgeführt. Diese diente auch als Basis für die vergleichende Abschätzung der Umweltauswirkungen (Carbon footprint). LCA-Untersu-

chungen zeigten bereits bei der Nachsortierung bestehender Fraktionen im Szenario „TBS light“ eine leichte Verbesserung (-2,3 %) der Klimawirkung des TBS-Ansatzes im Vergleich zum heutigen Sortier- und Verwertungssystem. Wird hingegen bestehende Sortiertechnik weitgehend durch TBS-Technik substituiert („TBS complete“) und damit der bisher als Ersatzbrennstoff verwertete Verpackungsstrom vollständig werkstofflich verwertet, so kann der grundsätzlich positive Umwelteffekt der Verpackungsabfallwirtschaft mehr als verdoppelt werden (-54 % im Vergleich zum konventionellen System). TBS führt so zu einer deutlichen Umweltentlastung hinsichtlich der Klimawirkung.

Danksagung

Der Großteil der hier vorgestellten Ergebnisse wurde ermöglicht durch eine Zuwendung des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) für das Vorhaben „Markerbasiertes Sortier- und Recyclingsystem für Kunststoffverpackungen (MaReK)“ als Teil des Rahmenprogramms „Forschung für nachhaltige Entwicklungen“ (FONA3) zum Thema „Kunststoffe in der Umwelt“ mit der Förderkennziffer 033R195A-E unter Betreuung des Projektträgers Jülich (PTJ). Ihnen sei herzlich gedankt. Darüber hinaus danken die Autoren Hendrik Beel und Thomas Probst von Steinert Unisort (Zittau) sowie Klaus Menrad und Thomas Decker von der Hochschule Weihenstephan-Triesdorf.

Die alleinige Verantwortung für diesen Text liegt bei den Autoren.

Literatur

- [1] Schüler, K: „Aufkommen und Verwertung von Verpackungsabfällen in Deutschland im Jahr 2018“, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, 2020.
- [2] Industrievereinigung Kunststoffverpackungen e.V.: „Sustainability Report 2018“, IK Industrievereinigung Kunststoffverpackungen e.V., Bad Homburg, 2018.

- [3] **Europäische Kommission:** „Richtlinie (EU) 2018/852 vom 30. Mai 2018 zur Änderung der Richtlinie 94/62/EG über Verpackungen und Verpackungsabfälle.“, 2018.
- [4] **Deutscher Bundestag:** „Gesetz über das Inverkehrbringen, die Rücknahme und die hochwertige Verwertung von Verpackungen: (Verpackungsgesetz – VerpackG) vom 05.07.2017“, 2017. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.gesetze-im-internet.de/verpackg/VerpackG.pdf>.
- [5] **Bund-Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall:** ATA – Ad-hoc-Ausschuss. Kennzeichnung/Identifikation von Kunststoffen. [Online]. Verfügbar unter: https://www.laga-online.de/documents/kik_bericht_18_1591617236.-v_06022020f (Zugriff am: 24. April 2021).
- [6] **J. Woidasky et al.:** „Hochwertiges Recycling durch Tracer-Nutzung: Mit dem „Tracer-Based-Sorting“-Ansatz sollen Verkaufsverpackungen zielgerichtet aus dem Abfallstrom abgetrennt werden“, *ReSource*, Jg. 30, Nr. 4, S. 24–28, 2017.
- [7] **Destatis, Hg.:** „Abfallentsorgung: Fachserie 19, Reihe 1“. [Online]. Verfügbar unter: https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/Abfallwirtschaft/Publikationen/Downloads-Abfallwirtschaft/abfallentsorgung-2190100177004.pdf?__blob=publicationFile&v=2. Zugriff am: 4. Mai 2021.
- [8] **DSD – Duales System Holding GmbH & Co. KG:** Downloads: Spezifikationen. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.gruener-punkt.de/de/downloads> (Zugriff am: 5. Mai 2021).
- [9] **K. Ragaert, L. Delva und K. van Geem:** „Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste“ (eng), *Waste management (New York, N.Y.)*, Jg. 69, S. 24–58, 2017, doi: 10.1016/j.wasman.2017.07.044.
- [10] **Steinert GmbH:** Verpackungen. [Online]. Verfügbar unter: <https://steinertglobal.com/de/abfall-recycling/verpackungen/> (Zugriff am: 4. Mai 2021).
- [11] **J. Woidasky et al.:** „Inorganic fluorescent marker materials for identification of post-consumer plastic packaging“, *Resources, Conservation and Recycling*, Jg. 161, S. 104976, 2020, doi: 10.1016/j.resconrec.2020.104976.
- [12] **A. Kusch, Gasde, Johannes, Deregowski, Carolin, J. Woidasky, C. Lang-Koetz und T. Viere:** „Sorting and recycling of lightweight packaging in Germany – climate impacts and options for increasing circularity using tracer-based-sorting“, *Materials Circular Economy*. Springer Verlag., In print as of May 4, 2021, 2021.
- [13] **P. Künkel, S. Gerlach und V. Frieg:** Stakeholder-Dialoge erfolgreich gestalten. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2016.
- [14] **J. Gasde, C. Klinke, J. Woidasky und C. Lang-Koetz:** „Integrierte Innovations- und Nachhaltigkeitsanalyse im Bereich Sortierung und Verwertung von LVP-Abfällen“ in Tagungsband des 9. Wissenschaftskongress „Abfall- und Ressourcenwirtschaft“ 2019, Amberg, 2019.

Anschrift der Autoren

J. Woidasky, M. Auer, J. Schmidt, A. Kusch, J. Gasde, C. Lang-Koetz
Hochschule Pforzheim
Tiefenbronner Str. 65, 75175 Pforzheim
www.hs-pforzheim.de
E-Mail: joerg.woidasky@hs-pforzheim.de

S. Wiethoff
Der Grüne Punkt – Duales System Deutschland GmbH
Edmund-Rumpler-Straße 7, 51149 Köln
www.gruener-punkt.de

I. Sander, A. Schau
Werner & Mertz GmbH
Rheinallee 96, 55120 Mainz
www.werner-mertz.com

F. Sorg
Umwelttechnik BW GmbH
Landesagentur für Umwelttechnik und
Ressourceneffizienz Baden-Württemberg
Friedrichstraße 45
70174 Stuttgart
www.umwelttechnik-bw.de

B. S. Richards, A. Turshatov, D. Busko
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Institut für Mikrostrukturtechnik (IMT)
Hermann-von-Helmholtz-Platz 1
Campus Nord, 76344 Eggenstein-Leopoldshafen
<https://www.imt.kit.edu>

A. Treick, P. Wendler, D. Kirchenbauer, D. Wacker, F. Fuchs, J. Moesslein
Polysecure GmbH
Sankt-Georgener Str. 19, 79111 Freiburg
www.polysecure.eu