

MANUSKRIFT

Moesslein, J.; Woidasky, J.: MaReK und Tracer Based Sorting 2.0: Sortiercodes für Kunststoffverpackungen und andere Materialströme. In: Teipel, U.; Schweppe, R. (Hrsg.): 5. Symposium Rohstoffinnovationen und Rohstoffeffizienz. 9./10. Mai 2019, Fraunhofer ICT, Pfinztal (Tagungsband). Fraunhofer Verlag, Stuttgart, 2019 (ISBN 978-3-8396-1466-2); S. 151-162

MAREK UND TRACER BASED SORTING 2.0: SORTIERCODES FÜR KUNSTSTOFFVERPACKUNGEN UND ANDERE MATERIALSTRÖME

J. Moesslein¹, J. Woidasky²

¹ Polysecure GmbH, St. Georgener Str. 19, 79111 Freiburg i. Br., e-mail: Jochen.Moesslein@polysecure.eu

² Hochschule Pforzheim, Tiefenbronner Str. 65, 75175 Pforzheim, e-mail: joerg.woidasky@hs-pforzheim.de

Keywords: *Verpackungs-Sortierung, Tracer Based Sorting, Anti-Stokes-Marker, Kunststoff, Identifikation*

1 Einleitung

Im Jahr 2017 wurden in Deutschland aus 6,2 Mio Mg Kunststoffabfällen insgesamt 1,9 Mio Mg Rezyklate hergestellt. Hiervon wurden knapp 1,8 Mio Mg gemeinsam mit 12,6 Mio Mg Neuware für die Herstellung von Kunststoffprodukten in Deutschland eingesetzt, so dass 12,3 % der Kunststoffverarbeitungsmenge in Deutschland durch Rezyklate gedeckt werden konnten. Dabei ist der Rezyklatanteil u. a. in der Verpackungsbranche unterdurchschnittlich, obwohl sie die den höchsten Kunststoffverbrauch aller Branchen aufweist (Tabelle 1).

Tabelle 1: Rezyklat-Anteile an der Kunststoff-Verarbeitungsmenge in Deutschland 2017 [1]

Branche	Gesamt-Verarbeitungsmenge 2017 (Neuware und Rezyklat) [10³ Mg]	Rezyklat-Verarbeitungsmenge 2017 [10³ Mg]	Anteil Rezyklat an Ges.-Verarbeitungsmenge [Gew.-%]
Verpackung	4.378	399	9,1
Bau	3.520	758	21,5
Fahrzeuge	1.611	77	4,8
Elektro/Elektronik	901	29	3,2
Haushaltswaren*	490	10	2,0
Möbel	463	19	4,0
Landwirtschaft	568	198	34,9
Medizin	262	0	0,1

Sonstiges	2.176	275	12,6
-----------	-------	-----	------

*einschließlich Sport/Spiel/Freizeit

Bezogen auf die Kunststoff-Abfallmenge von 6,2 Mio Mg in Deutschland, die zu 15,5 % aus Produktions- und Verarbeitungsabfällen ($953 \cdot 10^3$ Mg) und zu 84,5 % aus Post-Consumer-Abfällen ($5.201 \cdot 10^3$ Mg, davon $2.155 \cdot 10^3$ Mg von gewerblichen Endverbrauchern und $3.046 \cdot 10^3$ Mg aus privaten Haushalten) stammt, wurden durch die Herstellung von insgesamt 1,9 Mio Mg Rezyklaten weniger als ein Drittel aller Kunststoffabfälle in Deutschland werkstofflich verwertet [1]. Geht es um die Umsetzung kreislaufwirtschaftlicher Ansätze, so steht aufgrund der kurzen Nutzungsdauern der Produkte in Verbindung mit der großen verbrauchten Kunststoffmenge (vgl. Tabelle 1) die Verpackungsbranche besonders im Fokus. Auch die Regelungen des deutschen Verpackungsgesetzes, das zum 1.1.2019 in Kraft trat, erfordern unter anderem eine Erhöhung der werkstofflichen Verwertungsquote von Kunststoffverpackungen von 36 Gew.-% auf 63 Gew.-% bis 2022 [2].



Abbildung 1: Einsatz fluoreszierender Markermaterialien auf Etiketten und im Packstoff (Bildnachweis: Fa Polysecure)

Für das Erreichen anspruchsvoller werkstofflicher Verwertungsquoten sind neue Ansätze zur Erkennung und zur Sortierung von Kunststoffverpackungen erforderlich. Ein neuer Ansatz ist "Tracer-Based Sorting" (TBS), das die Sortierung von Produkten oder Werkstoffen unabhängig von deren physikalischen Eigenschaften ermöglicht. Der technische Kern dieses Ansatzes sind fluoreszierende, anorganische Markerstoffe (Abbildung 1), die auf Produkten oder z. B. in polymeren Werkstoffen verwendet werden. Ergänzt wird dieser Kennzeichnungsansatz durch eine spezifische, auf die Markerstoffe abgestimmte Identifikationstechnik.

Für die Handhabung von Abfallströmen nach der Identifikation kann bewährte Anlagentechnik verwendet werden. Im Gegensatz zu konventionellen spektroskopischen Verfahren wie NIR- oder Farberkennung, die direkte Werkstoffeigenschaften nutzen und oft ein schlechtes Signal-zu-Rausch-Verhältnis aufweisen, eröffnet TBS werkstoffunabhängige Identifikationsmöglichkeiten. Die TBS-Markierung fluoresziert nur bei einer spezifischen Anregung durch Licht im nicht sichtbaren Bereich. Die eingesetzten Leuchtstoffe sind Materialien mit einer hohen Quantenausbeute (Wirkungsgrad zwischen Anregung und Emission), so dass bereits geringste Mengen genügen, um eine charakteristische Fluoreszenz nachweisen zu können. Der für die Fluoreszenz genutzte „Anti-Stokes“-Effekt ist ausschließlich bei speziell hergestellten Markersubstanzen beobachtbar.

2 Sortieraufgaben in der Verpackungssortierung

Auch heute noch existieren verschiedene Arten von Trennaufgaben in der Praxis der Sortierung von Verpackungen, die auch fortgeschrittene spektroskopische Identifikations- und Sortierverfahren nicht lösen können:

- (1) Vorangereicherte Stoffströme von Kunststoffarten, d. h. durch konventionelle Technik getrennte Materialien, enthalten beispielsweise HDPE-Verpackungen oder PP-Verpackungen, die zu HDPE-Rezyklaten oder PP-Rezyklaten mit vorgegebenen Produkt- bzw. Werkstoffspezifikationen aufbereitet werden. Obwohl hier bereits eine Qualitätssicherung durchgeführt wird, stellen diese aus Verpackungen hergestellten HDPE- und PP-Mahlgüter, die regranuliert und compoundiert werden, Mischungen unterschiedlicher HDPE- und PP-Werkstofftypen dar. Eine weitergehende Trennung dieser Typen würde sowohl aus technischer als auch aus wirtschaftlicher Sicht weiteres Potential erschließen. Betrachtet man z. B. PP-Rezyklate aus Verpackungen, so liegen dort immer Mischungen aus Copolymer- und Homopolymer-Typen sowie aus Spritzguss- und Tiefziehtypen vor. Auch beim HDPE, das bei Endverbraucherpackungen neben seinem

Einsatz als Folien fast immer für Extrusions-blasgeformte Flaschen angewandt wird, liegen unterschiedliche Molekulargewichtsverteilungen vor. Eine konkrete Sortieraufgabe zur Ergänzung bestehender Sortiertechnik wäre die Differenzierung von HDPE-Flaschen aus unterschiedlichen HDPE-Typen. Werkstoffe, die jeweils auf dem gleichen Polymer beruhen, sind zwar grundsätzlich gut mischbar und gemeinsam verarbeitbar, allerdings könnte eine weitere Auftrennung die Einsatzmöglichkeiten der Rezyklate erweitern, da noch zielgerichteter Verarbeitungs- und Produkteigenschaften einstellbar wären. Diese Vorteile würden jedoch mit einer höheren Anzahl zu sortierender und getrennt zu haltender Fraktionen einher gehen, die die Komplexität des Stoffstrom-Managements erhöht.

(2) Kunststoffverpackungen können mit kreislaufeinschränkenden Ausrüstungsmerkmalen ausgestattet sein, die sich negativ auf die Rezyklat-Eigenschaften auswirken und nicht durch Verfahren nach dem Stand der Technik abtrennbar sind. Zu solchen Ausrüstungsmerkmalen zählen z. B. Verbundfolien-Komponenten mit problematischen Verwertungseigenschaften (Unmischbarkeit mit dem Hauptpolymer, stark abweichende Verarbeitungstemperatur oder geringe thermische Stabilität bei der Verarbeitungstemperatur des Hauptmaterials, nicht mit Dichtentrennverfahren vom Hauptpolymer abtrennbare Kunststoffbestandteile, mit herkömmlichen Aufbereitungsverfahren nicht abtrennbare Klebstoffe und Etiketten). Typischerweise kommen solche Ausrüstungsmerkmale nur in einem geringen Teil des zu Verwertung gelangenden Stoffstromes vor, so dass durch Verdünnungseffekte bei der Verwertung keine grundsätzlichen Einschränkungen des Rezyklateinsatzes befürchtet werden müssen. Dennoch werden die Einsatzmöglichkeiten des Rezyklats eingeschränkt, so dass das Anwendungspotential der Standard-Rezyklatqualitäten limitiert bleibt. Durch die Funktionalisierung von Verpackungen ist zukünftig mit einer Zunahme solcher Ausrüstungsmerkmale zu rechnen. Diese Entwicklung in Verbindung mit steigenden werkstofflichen Verwertungsquoten und der Nachfrage nach hochwertigen Rezyklaten motiviert die weitergehende Sortierung der Kunststoffverpackungen.

(3) Auch bei stofflich identischen Verpackungen kann eine Trennung sinnvoll sein. Dies ist unter anderem im Bereich der Lebensmittelverpackungen relevant (Food-/Non-Food-Anwendungen), wenn Food-Kontakt-Materialien zurückgewonnen werden sollen. Dieser Ansatz könnte die Trennung von PET-Flaschen aus Food- und Non-Food-Anwendungen aus dem Bereich der nicht bepfandeten Verpackungen ermöglichen. Auch in anderen Fällen können Reste des Füllgutes nachteilige Eigenschaften für die Verwertung bzw. für

die Rezyklate aufweisen, z. B. silikonhaltige HDPE-Kartuschen für Dichtmassen, deren Rest-Füllgutgehalte die Rezyklateigenschaften drastisch verschlechtern.

3 Das Forschungsvorhaben „MaReK“

Im durch das deutsche Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Verbundvorhaben „Markerbasiertes Sortier- und Recyclingsystem für Kunststoffverpackungen (MaReK)“ arbeiten unter Leitung der Hochschule Pforzheim die Firmen Polysecure GmbH (Freiburg), Werner & Mertz GmbH (Mainz), das Unternehmen Der Grüne Punkt – Duales System Deutschland GmbH (Köln), das Institut für Mikrostrukturtechnik des Karlsruher Institut für Technologie (KIT), die Unterauftragnehmer CMO-SYS GmbH und Nägele Mechanik GmbH sowie als assoziierter Partner Umwelttechnik BW GmbH (Landesagentur für Umwelttechnik und Ressourceneffizienz Baden-Württemberg) zusammen. Das Vorhaben wird mit etwa 2 Mio Euro Fördergeldern des BMBF im Rahmenprogramm „Forschung für Nachhaltige Entwicklung“ (FONA3) in der Fördermaßnahme „Plastik in der Umwelt“ unterstützt. Es zielt auf die Entwicklung und Erprobung einer Kombination aus Verpackungskennzeichnung und darauf abgestimmtem Sortierverfahren zur Gewinnung sortenreiner Kunststoffe. Das Konsortium arbeitet seit 2017 daran, Markermaterialien auf ihre Eignung in Kunststoff-Flaschen zu untersuchen und dieses Anwendungsfeld beispielhaft bis zum Pilotmaßstab zu entwickeln. Diese technische Fragestellung ist verbunden mit einem Geschäfts- und Governance-Entwicklungsprozess, in den die relevanten Stakeholder des Verpackungs-Stoffstroms eingebunden werden. So können neben den technischen auch wirtschaftliche und Umweltaspekte untersucht werden, um eine Verbesserung der Governance-Ansätze für den nachhaltigen Umgang mit Verpackungen in Deutschland und anderen potentiellen Anwendungsländern vorzubereiten.

4 Grundlagen des Tracer-Based Sorting

Tracer-Based Sorting (TBS) nutzt den Bereich der Fluoreszenz, der einfach mit elektromagnetischer Strahlung im nicht sichtbaren Bereich z. B. mit Laserdioden oder LED angeregt und mit einfachen Detektoren wie z. B. Kamerachips zerstörungsfrei erkannt wird [3]. Dabei erfolgen sowohl die Anregung als auch die Erkennung der Fluoreszenz in Millisekunden. Die Markersubstanzen besitzen einen hohen Wirkungsgrad zwischen Anregung und Emission (Quantenausbeute). Daher genügen bereits Spuren zwischen 1 und 100 ppm, um die charakteristische Fluoreszenz zu erzeugen und zu erkennen [4].

Während bei der „klassischen“ Stokes-Fluoreszenz die Anregungswellenlänge kleiner als die Emissionswellenlänge ist, werden bei der Anti-Stokes-Fluoreszenz (Upconversion-Fluoreszenz)

zwei und mehrere Photonen gesammelt, bevor ein höher energetisches Photon emittiert wird. So kann z. B. im IR-Bereich angeregt und im sichtbaren Bereich emittiert und detektiert werden. Die Quantenausbeuten bei der Stokes-Fluoreszenz liegen im zweistelligen Prozentbereich, die für die Anti-Stokes-Fluoreszenz im einstelligen Prozentbereich, jedoch mit einem im Vergleich zur Stokes-Fluoreszenz i. A. deutlich besseren Signal-zu-Rausch-Verhältnis. Bei der Detektion existiert neben der Anti-Stokes-Fluoreszenz kein physikalischer Prozess, der sichtbares Licht erzeugen kann, so dass kein physikalisch bedingtes Hintergrund-Rauschen zur Upconversion-Fluoreszenz erzeugt und damit ein sehr gutes Signal-zu-Rausch-Verhältnis erreicht wird.

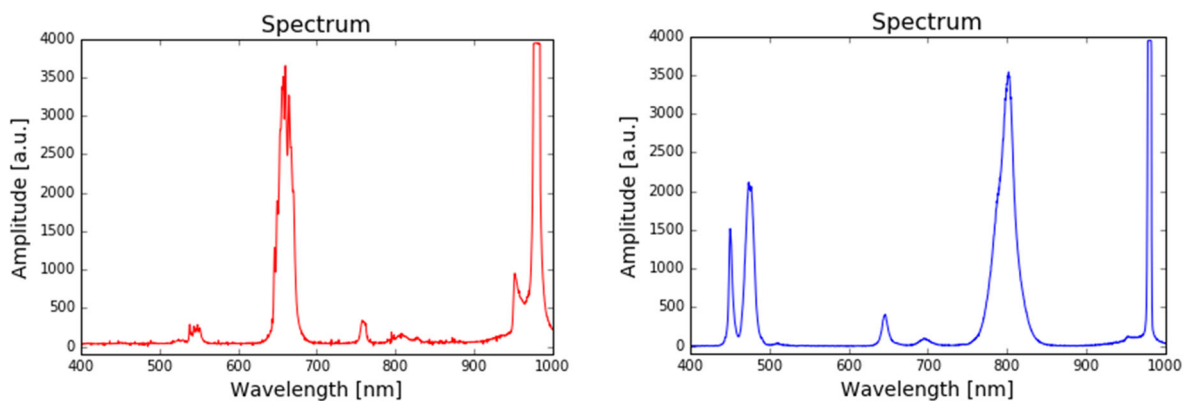


Abbildung 2: Emissions-Spektren von Upconversion-Materialien (Quelle: Fa. Polysecure)

Die in den letzten Jahrzehnten entwickelten anorganische Leuchtstoffe bestehen i. d. R. aus einem kristallinen Wirtsgitter mit Dotierstoffen (Aktivatoren, Sensibilisatoren) sowie Defekten und Verunreinigungen. Sie müssen durch komplexe Synthesen zum Teil bei hohen Temperaturen hergestellt werden. Maßgeblich für die Fluoreszenz sind die Aktivatoren, die durch elektronische Übergänge Energie abbauen und durch Sensibilisatoren unterstützt werden, die durch passende Energieübergänge den Energieabsorptionsprozess verbessern. Hohe Quantenausbeuten werden dann erreicht, wenn Defekte und Verunreinigungen gering gehalten werden. Durch die Dotierstoffe und die Formulierung können bestimmte, vergleichsweise definierte Emissions-Wellenlängen („Farben“) erzeugt werden (siehe Abbildung 2). Liegen z. B. Substanzen mit fünf verschiedenen Wellenlängen-Emissionen bei gleicher Anregungswellenlänge vor, so können damit kombinatorisch bereits 31 (2^5-1) unterscheidbare Codes erzeugt werden, die als Basis für die Lösung von Sortieraufgaben dienen.

Der TBS-Ansatz wird bereits heute im industriellen Maßstab für die Erkennung und Sortierung von PVC-Mahlgut beim Recycling von PVC-Fensterprofilen eingesetzt, um glasfaserhaltige von unverstärkten Polymeren zu trennen.

5 Einsatz des Tracer-Based Sorting für Verpackungen

Die Erhöhung werkstofflicher Verwertungsquoten von Verpackungskunststoffen kann mit Hilfe einer Sortiertechnologie umgesetzt werden, die Kunststoff-Produkte anhand eines zusätzlichen Trennmerkmals und nicht mehr durch werkstoffinhärente Merkmale trennt. So wird es z. B. möglich, gleiche Kunststoffe für verschiedene Anwendungen (Lebensmittel und Nicht-Lebensmittel) zu erkennen und getrennten Verwertungspfaden zuzuordnen. Diesen Ansatz setzt „Tracer-Based Sorting“ (TBS) um, indem in oder auf Verpackungen spezielle Marker-Substanzen im ppm-Bereich verwendet werden, die unter bestimmten Bedingungen fluoreszieren. Unter üblichen Gebrauchsbedingungen z. B. durch Sonnenlicht oder andere Lichtquellen wird kein Fluoreszenzeffekt ausgelöst, hierfür sind technische Identifikationseinrichtungen erforderlich.

Positionierungsoptionen für TBS bei der Verpackungsverwertung

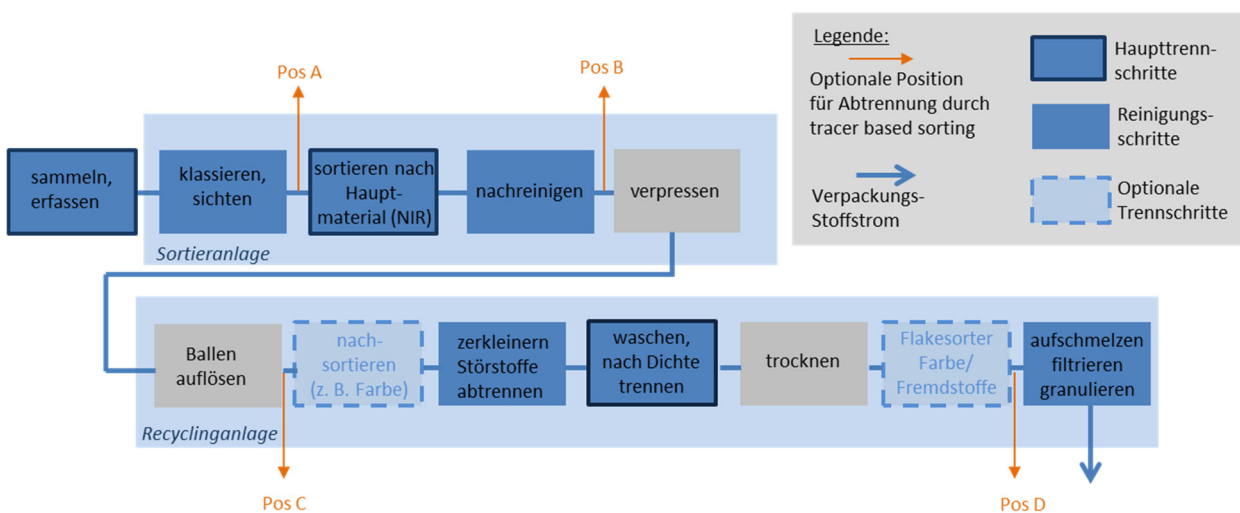


Abbildung 3: Positionierungsoptionen für TBS im Sortier- und Aufbereitungsprozess der Verpackungsverwertung [5]

So können Verpackungen durch Nutzung eines spezifischen Fluoreszenz-Markers entsprechend ihres sinnvollsten Entsorgungspfads gekennzeichnet und Stoffströme entsprechend gesteuert werden. Die markierte Verpackung kann in einem der derzeitigen Sortiertechnik nachgeschalteten Schritt aus einem angereicherten Gutstrom (z. B. aus Flaschen-Ballenware; siehe Positionen B und C in Abbildung 3) abgetrennt werden. Ein denkbarer Anwendungsfall besteht z. B. in der Abtrennung von PET-Flaschen mit PA-Sauerstoffbarriere, die in der Verwertung zu Vergilbung führt, von sonstigen nicht bepfandeten PET-Flaschen.

Die Positionierung des TBS-Schritts in der Verpackungsverwertung ist abhängig vom Verpackungsdesign in Verbindung mit der Marker-Auf- bzw. -Einbringung: Verpackungsmahlgüter (Abbildung 3, Position D) sind nur dann TBS-sortierbar, wenn die Markersubstanz in den Packstoff integriert ist oder schwer trennbar auf der gesamten Produkt-Oberfläche haftet. Werden die Markerstoffe nur auf Teilen der Packmittel-Oberfläche oder z. B. auf Etiketten aufgebracht, so sind die Sortier-Positionen A bis C möglich.

Alternativ ist auch ein Sortierkonzept für den Gesamt-Verpackungsstrom denkbar, das jedoch in Deutschland aufgrund der Pfadabhängigkeiten im Entsorgungssektor derzeit wenig wahrscheinlich ist, allerdings für die Neuentwicklung abfallwirtschaftlicher Systeme ein großes Potential aufweist („Leapfrogging“ in der Abfall- bzw. Verpackungssortierung).

6 Charakterisierung der Verpackungs-Flaschenfraktion

Zur werkstofflichen Charakterisierung von Verkaufsverpackungen aus Haushaltssammlungen liegen bereits zahlreiche Veröffentlichungen mit Informationen zu den als Packstoffen verwendeten Polymeren vor (beispielhaft [6]). Für die hochwertige Verwertung sind darüber hinaus jedoch noch weitere Eigenschaften wie die Einfärbung des Packstoffs, die Dekoration (Etiketten) sowie auch die verwendeten Verschluss-Systeme relevant.

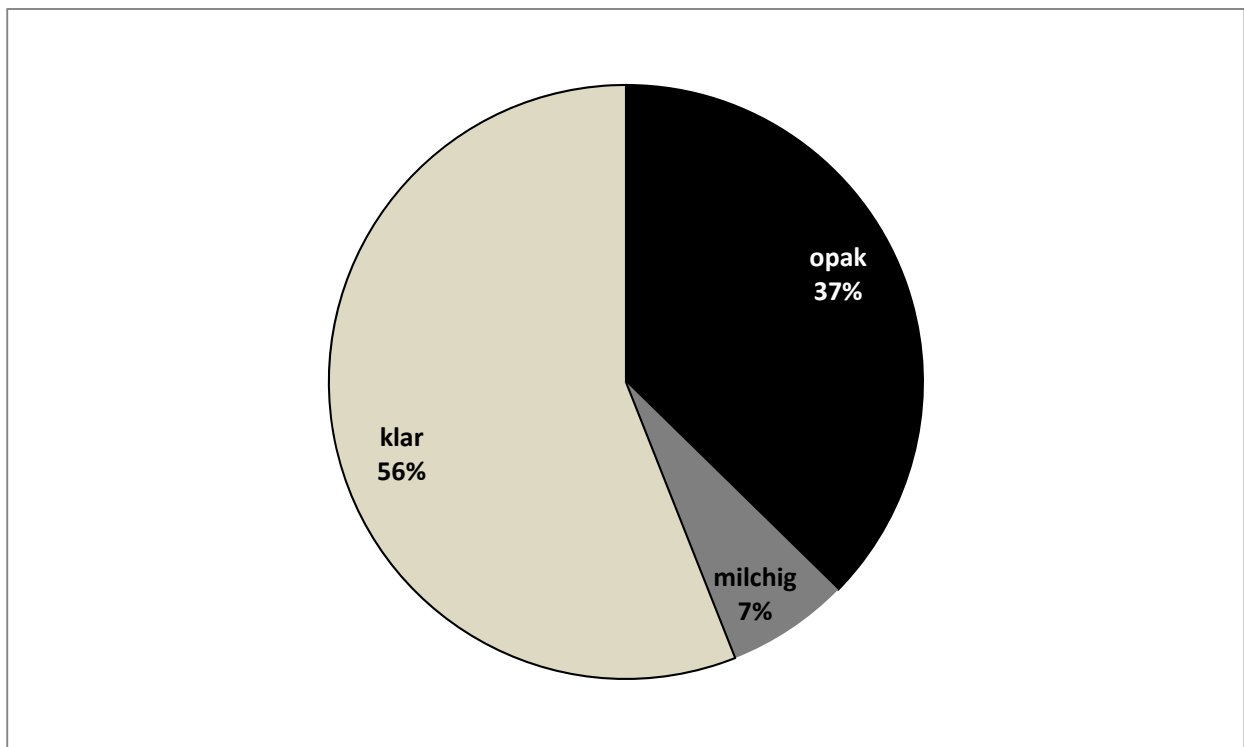


Abbildung 4: Transparenz-Eigenschaften von Verpackungs-Flaschen aus Haushalten in Deutschland

Eine orientierende Untersuchung der Hochschule Pforzheim zur verwertungsorientierten Charakterisierung von Verpackungs-Flaschen aus Endverbraucher-Haushalten im Jahr 2018 [7] erbrachte die in Abbildung 5 und Abbildung 4 dargestellten, auf die Anzahlen der untersuchten Packmittel bezogenen Ergebnisse: Aus insgesamt über dreißig Haushalten wurden im Zeitraum von etwa einer Woche im Juni 2018 alle unbefandeten Kunststoff-Flaschen gesammelt und anschließend verwertungsorientiert charakterisiert, unter anderem durch Erfassung der Farbe des Packstoffs (Abbildung 5) und des Transparenzgrades (Abbildung 4).

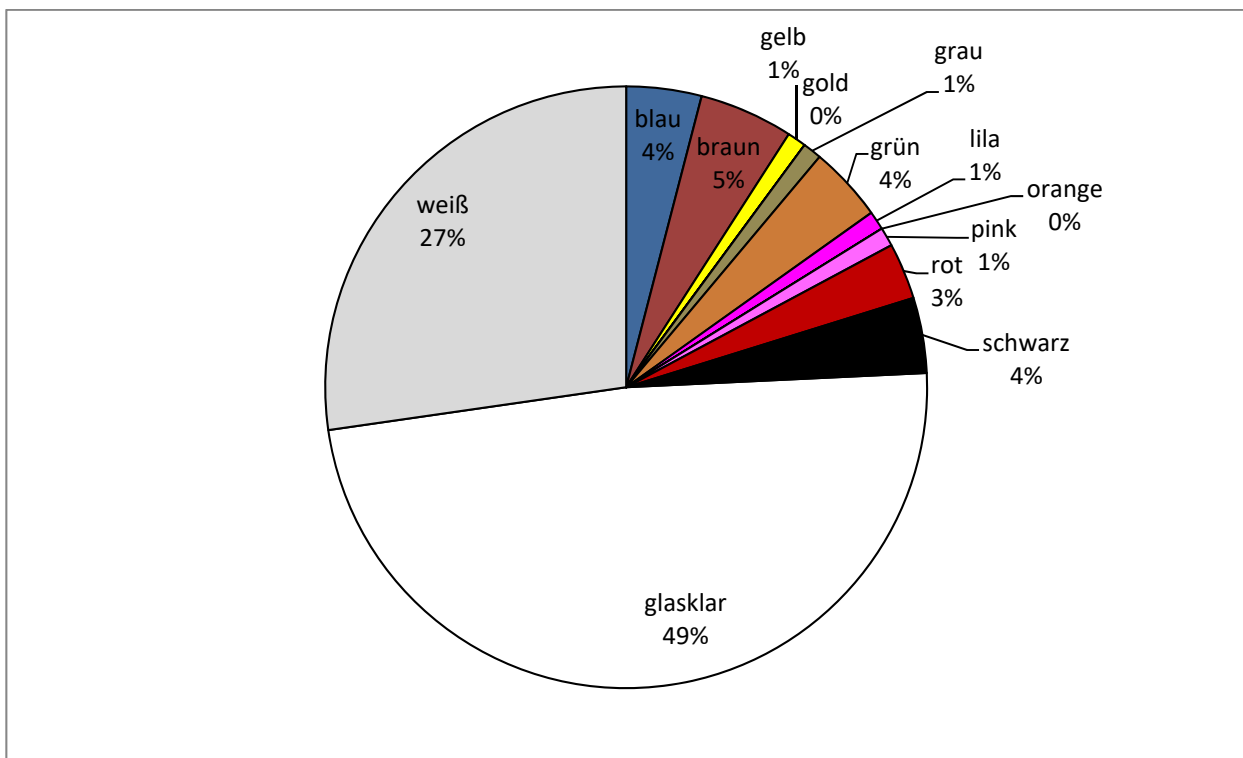


Abbildung 5: Farbverteilung bei Verpackungs-Flaschen (alle Transparenz-Eigenschaften) aus Haushalten in Deutschland

Im Ergebnis zeigte sich, dass die für Fluoreszenzverfahren grundsätzlich vorteilhaften Ausstattungsmerkmale „Transparenz“ (vgl. Abbildung 4: insgesamt 63 %) und im Falle gefärbter Verpackungen auch helle Farben wie Weiß, Gelb sowie glasklare Werkstoffe (vgl. Abbildung 5: insgesamt 77 %) bei den Verpackungsflaschen überwiegen.

7 Einsatz des Tracer-Based Sorting für andere Stoffströme

Die Kreislaufführung von Kunststoffbauteilen sowie auf Produkt- als auch auf Werkstoffebene (werkstoffliches Recycling) weist derzeit in Deutschland noch erhebliche Steigerungsmöglichkeiten auf (vgl. Tabelle 1). Neben der Verpackungswirtschaft können aufgrund der

Marktvolumina sowohl der Baubereich als auch der Fahrzeugbau als aussichtsreiche Anwendungsfelder gelten. Während TBS im Baubereich bereits für die PVC-Mahlgutsortierung im Recycling von Fensterprofilen eingesetzt wird, sind im Bereich des Fahrzeugbaus noch keine Anwendungen umgesetzt worden, obwohl auch hier ein großes technisches Anwendungspotential besteht: Markerstoffe können zur Erkennung und zur Authentifizierung sowohl von Produkten als auch von Werkstoffen dienen. Gerade beim Wiedereinsatz von Produkten (Remanufacturing) kann es zur Qualitätssicherung erforderlich sein, bei der Wiederaufarbeitung Gleichteile bestimmter Hersteller sicher erkennen zu können. Dies kann durch die Kennzeichnung durch Markermaterialien erfolgen. Auch weitergehende Informationen über die Produkte können durch eine Kombination verschiedener Emissions-Farben zu Marker-Codes zugewiesen werden.

Im Bereich der Werkstoffe können TBS-Ansätze sowohl besonders gut als auch besonders schlecht verwertbare Materialien kennzeichnen. Denkbar wäre z. B. die Kennzeichnung von Hochleistungs-Thermoplasten im Kfz-Bereich, um sie nach dem Shredderprozess aus der Shredderleichtfraktion separieren zu können. Auch die Kennzeichnung carbonfaserhaltiger Bauteile wäre möglich, um sie zielgerichtet aus dem Stoffstrom entweder für eine Verwertung oder aber zur sicheren Beseitigung abzutrennen.

8 Zusammenfassung

Im Jahr 2017 wurde weniger als ein Drittel aller Kunststoffabfälle in Deutschland werkstofflich verwertet. Für das Erreichen anspruchsvoller werkstofflicher Verwertungsziele sind neue Ansätze zur Erkennung und zur Sortierung von Kunststoffen erforderlich, da auch heute noch Trennaufgaben in der Praxis der Sortierung von Polymeren existieren, die auch fortgeschrittene spektroskopische Identifikations- und Sortierverfahren nicht lösen können.

Ein neuer kreislaufwirtschaftlicher Ansatz ist "Tracer-Based Sorting" (TBS). TBS ermöglicht die Sortierung von Produkten oder Werkstoffen unabhängig von deren physikalischen Eigenschaften. Hierzu werden anorganische Markersubstanzen auf bzw. in Produkten im ppm-Bereich eingesetzt, die nach einer Anregung im nicht sichtbaren Strahlungsspektrum eine sichtbare, charakteristische Fluoreszenz erzeugen und so eine einfache Erkennung ermöglichen. So wird es z. B. möglich, gleiche Kunststoffe für verschiedene Anwendungen (Lebensmittel und Nicht-Lebensmittel) zu erkennen und getrennten Verwertungspfaden zuzuordnen.

Der überwiegende Teil heutiger Kunststoff-Verpackungsflaschen aus Haushaltungen weist für Fluoreszenzverfahren grundsätzlich vorteilhafte Ausstattungsmerkmale wie z. B. transparente oder mit hellen Farben eingefärbte Werkstoffe auf. Neben der Verpackungswirtschaft können aufgrund der Marktvolumina auch der Baubereich und der Fahrzeugbau als aussichtsreiche

Anwendungsfelder gelten. Hier können TBS-Ansätze für die Positiv- oder Negativsortierung sowohl von Produkten bzw. Bauteilen als auch von Werkstoffen wie z. B. carbonfaserhaltiger Teile Einsatz finden.

Die markerbasierte Sortierung wird in einem öffentlich geförderten Vorhaben unter dem Titel „Markerbasiertes Sortier- und Recyclingsystem für Kunststoffverpackungen“ (Akronym: „MaReK“) untersucht. Das Vorhaben zielt auf die Entwicklung und Erprobung einer Kombination aus Verpackungskennzeichnung und darauf abgestimmtem Sortierverfahren zur Gewinnung sortenreiner Kunststoffe. Ein Konsortium aus Industrieunternehmen und Hochschulen arbeitet seit 2017 daran, Markermaterialien auf ihre Eignung in Kunststoff-Flaschen zu untersuchen und dieses Anwendungsfeld beispielhaft bis zum Pilotmaßstab zu entwickeln. Die technische Fragestellung ist dabei verbunden mit einem Geschäfts- und Governance-Entwicklungsprozess, in den die relevanten Stakeholder des Verpackungs-Stoffstroms eingebunden werden.

9 Danksagung

Die Autoren danken allen Konsortialpartnern, insbesondere Immo Sander, Alexander Schau, Daniel Kirchenbauer, Bryce Richards, Andrey Turshatov sowie Claus Lang-Koetz. Darüber hinaus sei Dr. Michael Heyde für die Unterstützung des Vorhabens herzlich gedankt.

Ein herzlicher Dank gilt dem BMBF, das im Rahmenprogramm „Forschung für Nachhaltige Entwicklung“ (FONA3) in der Fördermaßnahme „Plastik in der Umwelt“ die Förderung des Vorhabens gewährte (Förderkennzeichen 033R195A). Darüber hinaus gebührt der Projektträgerschaft PTJ, Außenstelle Berlin für die Betreuung des Vorhabens der Dank der Autoren.

Die Verantwortung für diese Veröffentlichung liegt ausschließlich bei den Autoren.

10 Literatur

- [1] Mantel, R.: Kunststoffe und Kreislaufwirtschaft. In: *Müll und Abfall*, Erich Schmidt Verlag GmbH & Co. KG, Berlin, ISSN: 0027-2957, Jg. 51 (2019), Nr. 2, S. 72 – 78
- [2] Gesetz über das Inverkehrbringen, die Rücknahme und die hochwertige Verwertung von Verpackungen (Verpackungsgesetz – VerpackG). Bundesgesetzblatt 2017, Teil I, Nr. 45, Bonn, 12.2.2017, S. 2234-2259
- [3] Ahmad, S.: A new technology for automatic identification and sorting of plastics for recycling. In: *Environmental Technology* 25 (10), 2004, S. 1143-1149, DOI: 10.1080/09593332508618380

- [4] Brunner, S, Fomin, P., Kargel, C.: Automated sorting of polymer flakes. Fluorescence labeling and development of a measurement system prototype. In: *Waste Management* (New York, N. Y.) 28, 2015, S. 49-60, DOI: 10.1016/j.wasman.2014.12.006
- [5] Woidasky, J., Heyde, M., Sander, I., Moesslein, J., Fahr, M., Richards, B., Turshatov, A., Lang-Koetz, C.: Hochwertiges Recycling durch Tracer-Nutzung. In: *ReSource*, 30. Jg., 4/2017, S. 24-28. Rhombos-Verlag, ISSN 1868-9531
- [6] Maletz, R.; Jöstingmeier, D.; Dornack, C.: Einfluss der Sammelqualität auf die NIR-Sortierung von Leichtverpackungen. In: *Müll und Abfall*, Erich Schmidt Verlag GmbH & Co. KG, Berlin, ISSN: 0027-2957, Jg. 49 (2017), Nr. 2
- [7] Nowak, N.; Kunde, S., Häuser, S.: „Flaschen für die Forschung“. Interdisziplinäre Projektarbeit. September 2018, Hochschule Pforzheim