

Hochwertiges Recycling durch Tracer-Nutzung

Mit dem „Tracer-Based-Sorting“-Ansatz sollen Verkaufsverpackungen zielgerichtet aus dem Abfallstrom abgetrennt werden

Von Jörg Woidasky, Michael Heyde, Immo Sander, Jochen Moesslein, Martin Fahr, Bryce Richards, Andrey Turshatov und Claus Lang-Koetz



Prof. Dr.-Ing. Claus Lang-Koetz
Nachhaltiges Technologie- und
Innovationsmanagement
Institut für Industrial Ecology (INEC),
Hochschule Pforzheim

Zitierweise:

Woidasky, Jörg; Heyde, Michael; Sander, Immo; Moesslein, Jochen; Fahr, Martin; Richards, Bryce; Turshatov, Andrey; Lang-Koetz, Claus: Hochwertiges Recycling durch Tracer-Nutzung. Mit dem „Tracer-Based-Sorting“-Ansatz sollen Verkaufsverpackungen zielgerichtet aus dem Abfallstrom abgetrennt werden. In: ReSource, 30. Jahrgang 2017, Heft 4, 2017, S. 24-28. Rhombos-Verlag, Berlin, ISSN: 1868-9531.

Das Verfahren „Tracer-Based-Sorting“ beschreibt einen neuen Ansatz in der Abfallwirtschaft, der es ermöglicht, Produkte oder Werkstoffe unabhängig von deren physikalischen Eigenschaften zu sortieren. Um zielgerichtet Stör- oder Wertstoffe aus dem Abfallstrom abtrennen zu können, werden hierzu anorganische Markerstoffe im ppm-Bereich auf Produkte aufgebracht und während des Entsorgungsvorganges detektiert. Ein Konsortium aus insgesamt fünf Unternehmen und Forschungseinrichtungen hat sich die Aufgabe gestellt, Markermaterialien auf ihre Eignung in Verkaufsverpackungen zu untersuchen und dieses Anwendungsfeld beispielhaft bis zum Pilotmaßstab zu entwickeln. Der Beitrag beschreibt hierfür die grundlegenden abfallwirtschaftlichen und technischen Herangehensweisen.

Keywords:

Verpackung, Sortierung, Tracer-Based-Sorting, Spektroskopie, Verwertung, Kunststoff, Fluoreszenz-Marker, Kennzeichnung, Stoffstrommanagement

In den vergangenen Dekaden stiegen die Abfallmengen aus Kunststoffverpackungen in Deutschland stark an. Während 1991 noch 1,6 Millionen Tonnen anfielen, waren es 2013 bereits 2,8 Millionen Tonnen, was einem Zuwachs um 77 Prozent entspricht [Schüler 2015], obwohl in gleicher Zeit Kunststoffverpackungen im Durchschnitt 26 Prozent leichter wurden [IK et al. 2015]. Die Weltbank geht davon aus, dass weltweit die Kunststoff-Abfallproduktion ihr Maximum nicht vor dem Jahr 2100 erreicht haben und sich bis dahin verdreifachen wird [Hoornweg et al. 2013]. Wie viel von diesem Kunststoff in die Umwelt gelangt, ist unter anderem abhängig vom Entwicklungsstand des betrachteten Landes [University of Georgia 2015]. Eine erste Studie zur Quantifizierung des globalen Plastikeintrags in die Weltmeere schätzt, dass von küstennahen Regionen im Jahr 2010 zwischen 4,8 und 12,7 Millionen Tonnen Kunststoffabfälle in die Ozeane gelangt sind und dass sich dort bis 2025 etwa 250 Millionen Tonnen Abfälle ansammeln werden, die nicht richtig gesammelt und behandelt wurden [Jambeck et al. 2015].

Die *Sammlung, Sortierung und Verwertung von Verkaufsverpackungen* aus dem Haushaltsbereich (Post-consumer) ist in Deutschland seit 1991 durch die Verpackungsverordnung geregelt. Wichtige Entwicklungen während dieser Zeit waren zunächst der Aufbau einer flächendeckenden, dualen Sammel- und Sortiertechnik einschließlich der Abstimmung mit den öffentlich-rechtlichen Entsorgungsträgern, die Einführung der Sortierung nach Kunststoffsorten (NIR-Identifikation anstelle der zunächst eingeführten Artikelsortierung), die Einführung des Pflichtpfandes für einen Teil der Einwegverpackungen und die Zulassung sowie der Aufbau mehrerer dualer Systeme aus Gründen des Kartellrechts. Zukünftige Entwicklungen beinhalten, dass die Verpackungserfassung zu einer Wertstoffeffassung entwickelt wird und die Verwertungsquoten erhöht werden: Das Verpackungsgesetz fordert, dass nach 2020 63 Gewichtsprozent der Kunststoff-Verpackungen wiederverwertet werden [VerpackG 2017]. Heute wird zwar die Gesamtverwertungsquote mit 99,6 Prozent [BMUB 2016] bei einer rechtlich geforderten Ge-

samtverwertungsquote von 60 Prozent deutlich überschritten, aber da in diese Werte auch die energetische Verwertung eingeht, bestehen bei der werkstofflichen Verwertung noch Potentiale: Zwar wird auch die rechtlich vorgegebene werkstoffliche Verwertungsquote von 36 Prozent mit rund 41 Prozent überschritten [UBA 2016], jedoch ist mit rund 57 Prozent die energetische Verwertung (daneben rund 1 Prozent rohstoffliche Verwertung) in diesem Bereich dominant.

Die hochwertige Verwertung von Kunststoffverpackungen funktioniert aus technischen und wirtschaftlichen Gründen nicht gut: Nicht gefährliche Kunststoffabfälle dürfen in Nicht-OECD-Länder verbracht werden, so dass es einen erheblichen Abfluss vor allem nach Asien gibt [KOM 2013]. Die aktuellen bewährten Sortier-techniken erreichen angesichts der Weiterentwicklung der Verpackungs- und Werkstofftechnik ihre Grenzen, da auch die Qualitätsanforderungen für Rezyklate steigen, zum Beispiel um eine Wiederverwertung im Verpackungsbereich zu ermöglichen. Aus Veröffentlichungen [KOM 2013] [VDI-TZ 2015] ist bekannt, dass die werkstoffliche Kunststoffverwertung noch Steigerungspotentiale aufweist und so zur Rohstoffsicherung beitragen kann. Diese Steigerungspotentiale bestehen auch für den Verpackungsbereich, obwohl er bereits durch die EU-Abfallrichtlinie (2008/98/EG), die EU-Verpackungsrichtlinie (1994/62/EG) und die entsprechenden nationalen Regelungen relativ engmaschig reguliert wurde.

Gleichzeitig stiegen aber auch die Anforderungen an die Leistungsfähigkeit von Verpackungen, die sich insbesondere aus der Beschaffenheit und Schutzbedürftigkeit des Füllgutes (etwa gegen Licht, Sauerstoff, Wasser, Kontaminationen, mechanische Einflüsse) im Zusammenhang mit Lebensmittelsicherheit, Abfüll- und Verpackungsprozessen, Absatzketten und Transportlogistik, Kosten, gesetzlichen und gegebenenfalls auch privatrechtlichen Anforderungen, Darstellung (Marketing) und Informationsvermittlung (beispielsweise Zubereitungshinweise, Inhaltsstoffe) gegenüber dem Endkunden ergeben. Technologische Trends liegen beispielsweise in der Entwicklung aktiver Verpackungen in Form von Sauerstoffadsorbentien, integrierten antimikrobiellen Substanzen auf pflanzlicher Basis, intelligenten Systemen mit Indikatorsystemen zur Anzeige des mikrobiologischen Status des verpackten Lebensmittels, Kunststoffen aus biologischen Quellen beziehungsweise biotechnologischer Produktion oder bioabbaubaren Kunststoffen [Langowski 2015] [BÖLW, 2011] [IVV 2011]. Oft tritt dabei die Umweltverträglichkeit, die durch Footprints und Ökobilanzierung festgestellt werden kann, in den Hintergrund.

Allerdings wäre es aus Sicht der *Klimapolitik* wünschenswert, das werkstoffliche Recycling von Verpackungskunststoffen auszuweiten: Wie die Studie des RWI ([RWI 2016] zusammenfasst, liegen die Kohlendioxid-Minderungskosten des dualen Systems mit 17 Euro pro Tonne eingespartem Kohlendioxid deutlich niedriger als bei Klimaschutzmaßnahmen zum Ausbau regenerativer Energiequellen (rund 85 Euro).

Trenntechniken

Die Sortierung, das heißt die Trennung eines Haufwerks nach Stoffeigenschaften, ist eine der grundlegendsten Techniken der Aufbereitungstechnik und damit auch der Abfallwirtschaft. Im Rahmen der (manuellen) Klaubung werden Oberflächeneigenschaften wie Farbe oder Glanz etwa bei der Aufberei-

Das Vorhaben „MaReK“

In dem vom 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. Gefördert wird es mit etwa zwei Millionen Euro Fördergeldern des BMBF im Rahmenprogramm „Forschung für Nachhaltige Entwicklung“ (FONA3) in der Fördermaßnahme „Plastik in der Umwelt“. Technischer Kern des vorgeschlagenen Vorhabens ist die Entwicklung und Erprobung einer Kombination aus Verpackungskennzeichnung und darauf abgestimmtem Sortierverfahren zur Gewinnung sortenreiner Kunststoffe. Dieser Ansatz wird ergänzt durch die verwertungsorientierte Qualifikation der gewonnenen Rezyklate. Die technische Fragestellung ist eingebettet in einen Entwicklungsprozess, der die relevanten Stakeholder des Verpackungs-Stoffstroms einbezieht, neben den technischen auch wirtschaftliche und Umweltaspekte untersucht (Nachhaltigkeitsorientierung) und auf eine Verbesserung der Governance-Ansätze für den Umgang mit Verpackungen in Deutschland abzielt.

Das Projekt begann am 1. Juli 2017 und hat eine geplante Projektlaufzeit von zweieinhalb Jahren.

tung von Erzen oder Kohle, aber auch zum Beispiel bei der Schrottsortierung (Kupfer/-legierungen) genutzt. Automatisierte Verfahren wurden in der Abfallwirtschaft zunächst im sichtbaren Licht für die Glassortierung (Farbsortierung beziehungsweise das Abtrennen opaker Partikel) eingesetzt [Martens 2016], später auch für die Weiterentwicklung der Verpackungssortierung von einer Artikel- zur Werkstoffsartierung [Habich 2014]. Gerade im Verpackungsbereich sind jedoch nach diesem Technologiewechsel kaum weitere Innovationen zur Sortierung festzustellen gewesen.

Heute werden über sichtbares Licht hinaus auch weitere Strahlungsbereiche und physikalische Eigenschaften bei der Sortierung angewendet (vgl. Tabelle 1). Die Sortierung wird zum einen durch die Nutzung mehrerer Wellenlängenbereiche (Hyperspektral-

Sortiertechnologie	Wellenlänge	Materialeigenschaft	Mögliche Sortierungen
NIR-Spektroskopie (Reflexion)	780 – 3.000 nm	Absorptionsbanden Moleküle	Kunststoffsorte (z.B. PE, PP, PET)
VIS-Spektroskopie	400 – 780 nm	Farbe	Metalle, Papier
CCD-Farbkamera	400 – 1.000 nm	Farbe, Form	Metalle, Glas
Elektromagnetischer Sensor		Elektrische Leitfähigkeit	Metalle, Schrott, Elektronik
Röntgen-Fluoreszenz-Spektroskopie (RFA)	0,0001 – 1 nm	Chemische Zusammensetzung	Metalle, Erze
Laser & Kamera	200 – 1.000 nm	Farbe, Fluoreszenz	Glas, Lebensmittel
Wirbelstromabscheider		Leitfähigkeit (induzierte Spannung)	Nichteisenmetalle
Magnetabscheider		Ferro- und Paramagnetismus	Eisen, Eisenoxide
Schwimm-Sink-Verfahren		Dichte	Kunststoffe

Tabelle 1: Sortiertechnologien und damit mögliche Sortierungen

analyse) verbessert, zum anderen durch die Kombination mehrerer Sensoren (Multisensorik). So wird zum Beispiel bei der Sortierung von PET-Verpackungen eine Kombination von NIR- und VIS-Sensoren¹ eingesetzt, um die Kunststoffsorte abzutrennen. Auch bei der Sortierung von Mahlgütern ist bereits eine Trennung nach Flake-Farben möglich. Die sensorgestützte Sortierung kann insgesamt für die Bereiche der Kunststoffarten- und Glassortierung, bei der Kunststoff-Metall-Sortierung sowie für die Sortierung von Metall-Monofractionen, von Holz, Leiterplatten, und Papier sowie bei Baumischabfällen als Stand der Technik gelten [Martens 2016].

Die spektrometrischen Systeme der Sortierung im Bereich des nahen Infrarot und des sichtbaren Lichtes sind in der Abfallwirtschaft am weitesten verbreitet. Typische Verpackungs-Sortieranlagen nutzen 15 bis 20 dieser NIR-Systeme für die Trennung von Kunststoffen (PE, PP, PS, PET). Die besondere Herausforderung besteht hier in steigenden Qualitätsanforderungen in Verbindung mit schwankender Inputqualität, die zunehmend den Einsatz mehrstufiger Sortierkombinationen erfordert. Speziell bei PET wird die NIR-VIS-Kombination eingesetzt, um ein „Bottle-to-bottle“-Recycling zu ermöglichen, das nur durch die Beherrschung der Farbproblematik (transparente glasklare, braune, blaue oder anderweitig farbige PET-Verpackungen, opakes Material) möglich ist [Uepping 2013].

Technologiebedarf

Derzeit existieren *praxisrelevante Trennaufgaben, die auch die spektroskopische Sortiertechnik nicht löst*. Solche Trennaufgaben lassen sich in drei Typen klassifizieren:

Typ 1: Materialien, die durch konventionelle Technik nach Kunststoffart getrennt werden, enthalten zum Beispiel HDPE-Verpackungen oder PP-Verpackungen, die zu HDPE-Rezyklaten oder PP-Rezyklaten mit einem bestimmten Anwendungsspektrum aufbereitet werden. Diese Anwendungsspektren weisen noch erhebliche Wachstums- und Wertschöpfungspotentiale auf, an denen konsequent gearbeitet wird. Gleichwohl stellen aus Verpackungen hergestellte HDPE und PP-Mahlgüter, die regranuliert und compoundingiert werden, *Mischungen unterschiedlicher HDPE- und PP-Typen dar*, für die, könnte man sie trennen, weitere Wertschöpfungspotentiale erschließbar wären. Beispielsweise sind PP-Rezyklate aus Verpackungen immer Mischungen aus Copolymer- und Homopolymer-Typen sowie aus Spritzguss- und Tiefziehtypen. Selbst HDPE, das bei Endverbraucherpackungen fast ausschließlich für im Extrusions-Blasverfahren hergestellte Flaschen zur Anwendung kommt (solange es sich nicht um Folien handelt), unterteilt sich in verschiedene Typen, die, je nach Anforderungen des Füllgutes, unterschiedliche Molekulargewichtsverteilungen aufweisen. Diese Differenzierungsmerkmale kennzeichnen Werkstoffe, die jeweils auf dem gleichen Polymer beruhen, gut mischbar und gemeinsam verarbeitbar sind. Ihre Auftrennung würde die potentiellen Anwendungen und Absatzmärkte der Rezyklate erweitern, aber gleichzeitig die Komplexität des Stoffstrommanagements erhöhen. Ein konkretes Anwendungsbeispiel für die Ergänzung bestehender Sortiertechnik wäre die Differenzierung von HDPE-Flaschen aus unterschiedlichen HDPE-Typen.

Typ 2: Kunststoffverpackungen können *kreislaufeinschränkende Ausrüstungsmerkmale* aufweisen, die sich negativ auf die Eigenschaften der gewonnenen Rezyklate auswirken und die nicht in der konventionellen Sortierung und Aufbereitung abtrennbar sind. Solche Ausrüstungsmerkmale können beispielsweise sein:

- Verbundfolien-Bestandteile, die in der Schmelze nicht gut mit dem Hauptmaterial mischbar sind, bei stark abweichenden Temperaturen aufschmelzen oder im Bereich der Verarbeitungstemperaturen des Hauptmaterials thermisch abgebaut werden,
- vom Hauptmaterial abweichende Kunststoffbestandteile der Verpackung, die nach Zerkleinerung nicht durch Dichte-Trennung abscheidbar sind,
- Klebstoffe und Etiketten, die in der herkömmlichen Aufbereitung nicht abgetrennt werden können,
- in das Hauptmaterial eincompoundierte Nebenbestandteile zur Erzeugung spezieller Verpackungsfunktionen wie Barriere-Eigenschaften.

Den meisten dieser Merkmale ist gemeinsam, dass sie in Verpackungen angewendet werden, die nur einen (kleinen) Teil des Stoffstromes ausmachen, der jeweils der Verwertung zugeführt wird. Weiterhin wirken sich die störenden Bestandteile in kleinen Konzentrationen für die meisten Standardanwendungen des jeweiligen Rezyklates nicht grundsätzlich kreislaufschränkend aus, sondern schränken die Anwendungsmöglichkeiten in Abhängigkeit ihrer Konzentration im Rezyklat ein. Gleichwohl ist davon auszugehen, dass der Anteil von Verpackungen dieser Art am Gesamtaufkommen steigen wird. Auch ist zu erwarten, dass diese Verpackungen in jenen Anteilen des Verpackungsaufkommens stärker auftreten, die heute noch überwiegend energetisch verwertet werden und zukünftig aufgrund der Quotenerhöhung im Rahmen gesetzlicher Vorgaben einer werkstofflichen Verwertung zuzuführen sind.

Typ 3: Auch bei Verpackungen, die stofflich identisch sind, kann ein Interesse bestehen, diese zu trennen, beispielsweise nach *Verwendungsart* der Verpackung (Food/non Food). Im Einzelfall können Füllgutreste die Verwendung der Rezyklate dauerhaft limitieren (prominentes Beispiel: HDPE-Kartuschen für Dichtmassen, insbesondere silikonhaltige Produkte). Herkömmliche Trennverfahren, die sich an stofflichen Eigenschaften orientieren, können hier naturgemäß nicht eingesetzt werden. Ein konkretes Anwendungsbeispiel für die Ergänzung bestehender Sortiertechnik wäre die Getrennthaltung von PET-Flaschen aus Food- und Nonfood-Anwendungen.

Tracer-Based Sorting (TBS)-Ansatz

Das werkstoffliche Recycling von Verpackungskunststoffen könnte durch eine Sortiertechnologie gesteigert werden, die Kunststoffe mit geringsten Unterschieden oder gleiche Kunststoffe für verschiedene Anwendungen (Lebensmittel und Nicht-Lebensmittel) effizient trennen kann. Einen möglichen Lösungsansatz hierfür stellt das „*Tracer-Based Sorting*“ (TBS) dar. Es basiert auf speziellen Substanzen, die unter bestimmten Bedingungen fluoreszieren und als Marker (in sehr geringen Mengen) genutzt werden, um Kunststoffverpackungen zu kennzeichnen. Ein weiterer Vorteil dieses Ansatzes ist, dass im alltäglichen Gebrauch weder die Sonne noch andere Lichtquellen intensiv genug sind, um die sichtbare Fluoreszenz zu erzeugen.

Daher können folgende Aspekte umgesetzt werden:

- Verpackungen werden durch Nutzung eines spezifischen Fluoreszenz-Markers entsprechend ihres wirtschaftlichsten Verwertungspfad gekennzeichnet. Dabei kann die Kennzeichnung grundsätzlich sowohl im Packstoff als auch auf der Verpackung-Dekoration erfolgen.

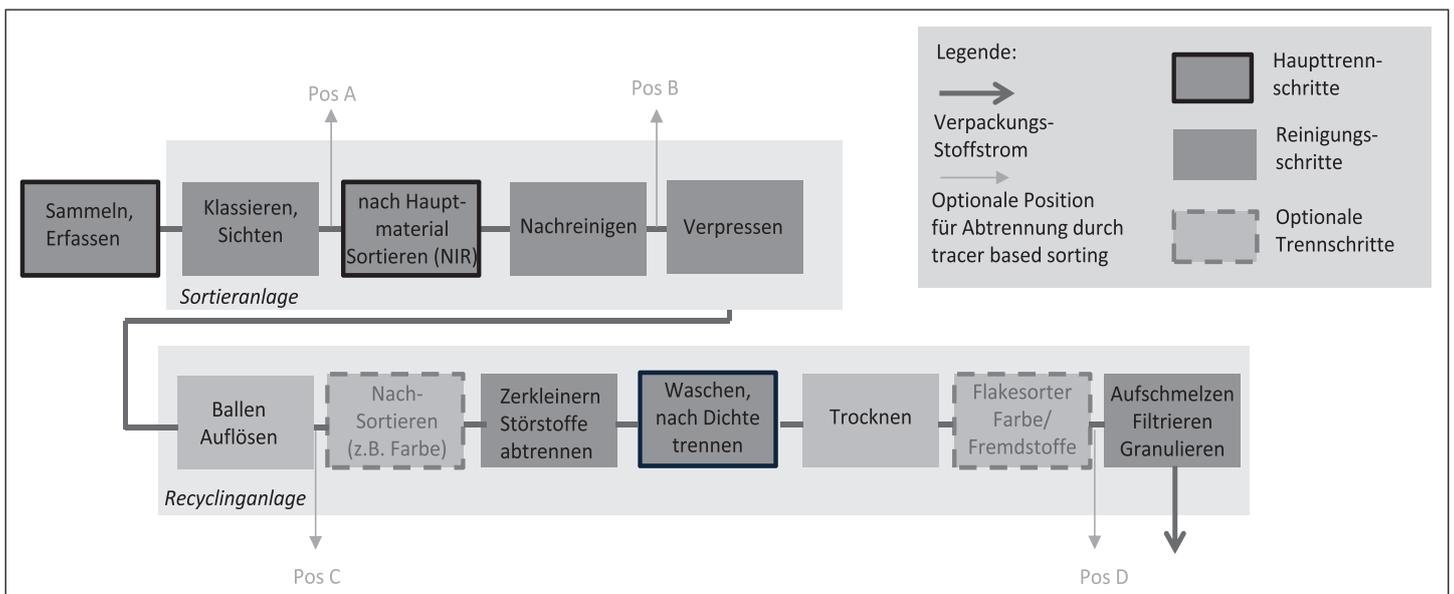


Abbildung 1: Positionierungsoptionen für TBS im Sortier- und Aufbereitungsprozess der Verpackungsverwertung

- Die markierte Verpackung wird in einem Schritt, der der derzeitigen Sortiertechnik nachgeschaltet ist, aus dem angereicherten Gutstrom (zum Beispiel aus Flaschen-Ballenware) abgetrennt.
- Im abgetrennten Strom kann die Verpackungs-Dekoration, die Marker enthält, abgelöst und zur Wiederverwertung bereitgestellt werden.

So leistet die TBS-Technologie einen erheblichen Beitrag zur Ausweitung des werkstofflichen Recyclings, indem hochwertige, sortenreine oder sogar typenreine Polymerströme für eine Verwertung aussortiert werden. Die neue Technologie ist auch für Länder interessant, in denen die Sortierung für ein werkstoffliches Recycling noch wenig etabliert ist, so dass dort im Sinne eines „Leapfrogging“⁴² mehrere Generationen der Abfall- oder Verpackungssortierung übersprungen werden können.

Ein konkretes Anwendungsbeispiel für die Weiterentwicklung bestehender Sortiertechnik durch TBS besteht in der Differenzierung von PET-Flaschen mit erhöhter Sauerstoffbarriere⁴³ von sonstigen, nicht befandeten PET-Flaschen.

Tracer Based Sorting (TBS) ist als Ergänzung zu konventionellen Trennkonzepthen einsetzbar. Hier sind verschiedene Positionen in der Wertschöpfungskette vorstellbar, an denen TBS eingesetzt werden kann (siehe Abbildung 1). Die Auswahl der geeigneten Position für TBS in der Wertschöpfungskette ist mit der Strategie der Aufbringung des Tracers eng verknüpft: Auf Flake-Ebene (Position D) wird man nur dann sortieren können, wenn der Tracer in der Kunststoffmatrix eingebunden ist oder schwer trennbar auf der gesamten Oberfläche haftet. Bei den Positionen A bis C ist denkbar,

dass der Tracer auf Teil-Oberflächen sowie auf Etiketten aufgebracht wird.

Grundlagen des TBS

Für Tracer-Based Sorting (TBS) ist der Bereich der Fluoreszenz relevant, der günstig und schnell mit elektromagnetischer Strahlung (beispielsweise mit Laserdioden, LEDs) angeregt und mit einfachen Detektoren (etwa mit Kamerachips) zerstörungsfrei nachgewiesen werden kann. Anregung und Erkennung können in Millisekunden zerstörungsfrei erfolgen. Die Markierung ist im täglichen Alltag unsichtbar und fluoresziert nur bei einer spezifischen Anregung (durch Licht im nicht sichtbaren Bereich). Die eingesetzten Leuchtstoffe sind Materialien mit einem hohen Wirkungsgrad zwischen Anregung und Emission (Quantenausbeute), so dass bereits Spuren (1 – 100 ppm) genügen, um eine charakteristische Fluoreszenz nachweisen zu können.

Neben der „klassischen“ Stokes-Fluoreszenz (Anregungswellenlänge ist kleiner als Emissionswellenlänge) mit Quantenausbeuten im zweistelligen Prozentbereich gibt es auch die sogenannte Anti-Stokes-Fluoreszenz (Upconversion-Fluoreszenz). Hierbei werden zwei und mehrere Photonen gesammelt, bevor ein höher energetisches Photon emittiert wird. Dadurch kann zum Beispiel im IR-Bereich angeregt und im sichtbaren Bereich emittiert und detektiert werden. Es werden zwar nur Quantenausbeuten im einstelligen Prozentbereich erreicht, das Signal-zu-Rausch-Verhältnis ist jedoch im Allgemeinen deutlich besser als bei der Stokes-Fluoreszenz. Der Grund ist, dass die Anregungsstrahlung nur über den Anti-Stokes-

Effekt sichtbare Strahlung erzeugen kann. Ansonsten gibt es keinen möglichen physikalischen Prozess, der sichtbares Licht erzeugen kann. Folglich gibt es kein physikalisch bedingtes Hintergrund-Rauschen zur Upconversion-Fluoreszenz und damit ein sehr gutes Signal-zu-Rausch-Verhältnis.

In den vergangenen Jahrzehnten sind zahlreiche anorganische Leuchtstoffe entstanden, die in der Regel aus einem kristallinen Wirtsgitter, den Dotierstoffen (Aktivatoren, Sensibilisatoren) sowie Defekten und Verunreinigungen bestehen und über komplexe Synthe-

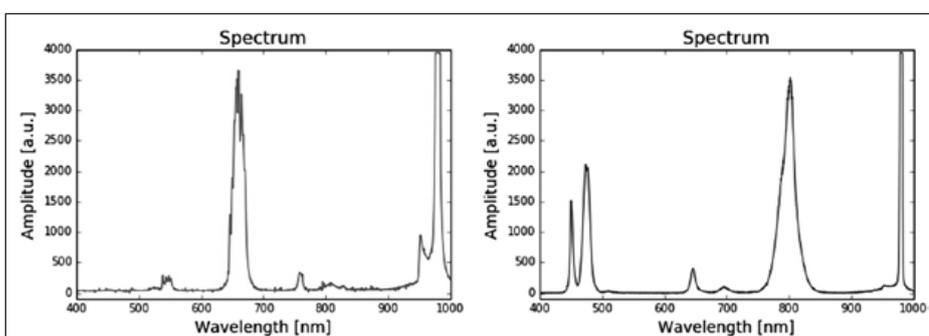


Abbildung 2: Emissions-Spektren von Upconversion-Materialien (Quelle: Fa. Polysecure)

sen hergestellt werden. Die Fluoreszenz geht auf die Aktivatoren zurück, die durch elektronische Übergänge Energie abbauen. Sensibilisatoren unterstützen durch passende Energieübergänge den Energieabsorptionsprozess. Um zu hohen Quantenausbeuten zu kommen, müssen zusätzlich Defekte und Verunreinigungen geringgehalten werden. Über die Dotierstoffe und die Formulierung können bestimmte, vergleichsweise wellenlängen-scharfe Emissionen erzeugt werden (siehe Abbildung 2). Mit einem Portfolio aus fünf verschiedenen Emissionen, bei voraussichtlich gleicher Anregungswellenlänge, können kombinatorisch bereits 31 (2^5-1) unterscheidbare Codes erzeugt werden.

Förderung

Das Vorhaben „MaReK“ wird vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmenprogramm „Forschung für Nachhaltige Entwicklung“ (FONA3) in der Fördermaßnahme „Plastik in der Umwelt“ mit dem Förderkennzeichen 033R195A-E gefördert und von der Projektträgerschaft Jülich (PTJ) betreut. Die Verantwortung für diese Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Literatur

- [VerpackG 2017] Gesetz zur Fortentwicklung der haushaltsnahen Getrennterfassung von wertstoffhaltigen Abfällen. BGBl. Jg. 2017, Teil I Nr. 45. Bonn, 12. Juli 2017
- [BMUB 2016] <http://www.bmub.bund.de/typo3temp/GB/77efd9f6a3.png>, aufgerufen 23. August 2016
- [BÖLW 2011] BÖLW (Hrsg.) 2011. Nachhaltige Verpackung von Bio-Lebensmitteln. Ein Leitfaden für Unternehmen, Berlin.
- [Habich 2014] Habich, U.; Beel, H., 2014. Modifizierung von Recyclingverfahren durch sensorbasierte Sortierung. In: Thomé-Kozmiensky, K. J.; Goldmann, D.: Recycling und Rohstoffe. Band 7. TK-Verlag, Neuruppin, S. 471-482
- [Hoorweg et al. 2013] Hoorweg, D., Bhada-Tata, P., Kennedy, C., 2013. Environment: Waste production must peak this century. Nature 502, 615–617.
- [IK et al. 2015] IK, PlasticsEurope, BKV, 2015. Kunststoffverpackungen: mehr Effizienz, weniger Gewicht (Presse-Informationen). IK Industrievereinigung Kunststoffverpackungen e.V., Bad Homburg/Frankfurt am Main.
- [IVV 2011] Fraunhofer IVV, TU München, 2011. Studie zum Innovationssektor Lebensmittel und Ernährung, Freising, Berlin.
- [Jambeck et al. 2015] Jambeck, J.R.; Geyer, R.; Wilcox, C.; Siegler, T.R.; Perryman, M.; Andrady, A.; Narayan, R.; Law, K.L., 2015. Plastic waste inputs from land into the ocean. Science 347, 768-771.
- [KOM 2013] Europäische Kommission (Hrsg.): Grünbuch zu einer europäischen Strategie für Kunststoffabfälle in der Umwelt. Brüssel, den 7. März 2013; COM (2013) 123 final; S. 10
- [Langowski 2015] Langowski, H.C., 2015. Trends, Nachhaltigkeit, Akzeptanz. Herausforderungen bei Kunststoffverpackungen. Kunststoffe 10/2015, Carl Hanser Verlag, München.
- [Martens 2016] Martens, H.; Goldmann, D., 2016: Recyclingtechnik. 2. Auflage. Springer Vieweg Verlag, Wiesbaden, S. 57 f.
- [RWI 2016] Schmitz, Helmut; Völl, Norbert, 2016. Ökonomische Perspektiven des Kunststoffrecyclings – die Rolle des dualen Systems, RWI – Leibniz-Institut für Wirtschaftsforschung e.V.
- [Schüler 2015] Schüler, K., 2015. Aufkommen und Verwertung von Verpackungsabfällen in Deutschland im Jahr 2013. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau.
- [UBA 2016] <https://www.umweltbundesamt.de/themen/abfall-ressourcen/produktverantwortung-in-der-abfallwirtschaft/kunststoffe>, aufgerufen 23. August 2016
- [Uepping 2013] Uepping, R., 2013. Sensorgestützte Sortiertechnik. In: Thomé-Kozmiensky, K. J.; Goldmann, D.: Recycling und Rohstoffe. Band 6. TK-Verlag, Neuruppin, S. 371-383
- [University of Georgia, 2015] University of Georgia, 2015. Study: Stunning amount of plastic waste in the oceans || University of Georgia [WWW Document]. Study Stunning Amount Plast. Waste Oceans UGA Univ. Ga. URL http://www.uga.edu/about_uga/profile/study-stunning-amount-of-plastic-waste-in-ocean (accessed 8. August 2016).
- [VDI-TZ 2015] VDI Technologiezentrum (Hrsg.), 2015. Plastik in der Umwelt – Quellen, Senken, und Lösungsansätze. Düsseldorf, S. 14

Anmerkung

- 1 NIR: Nahes Infrarot, VIS: Visible Imaging Sensor / Sichtbares Licht-Sensor
- 2 „Leapfrogging“ bezeichnet im Allgemeinen ein (freiwilliges) Auslassen einzelner Stufen im Laufe eines Entwicklungsprozesses.
- 3 Erzeugt durch Compoundbestandteile im PET wie beispielsweise PA, die in der Folgerverarbeitung zur Vergilbung führen.

Kontakt



Prof. Dr.-Ing. Jörg Woidasky

Hochschule Pforzheim
Fakultät für Technik/Nachhaltige Produktentwicklung
Tiefenbronner Straße 65 · D-75175 Pforzheim
Tel. +49-7231-28-6489 · Fax +49-7231-28-6057
eMail joerg.woidasky@hs-pforzheim.de
Internet: <http://www.hs-pforzheim.de/marek>



Michael Heyde

Der Grüne Punkt – Duales System Deutschland GmbH
Frankfurter Straße 720-726 · D-51145 Köln (Porz-Eil)
eMail: Michael.Heyde@gruener-punkt.de
Internet: <https://www.gruener-punkt.de/>



Immo Sander

Leiter Verpackungsentwicklung
Werner & Mertz GmbH
Rheinallee 96 · D-55120 Mainz
Tel. +49 6131 964 2920 · GSM: +49 175 570 3596
eMail: isander@werner-mertz.com
Internet: <https://werner-mertz.de/>



Jochen Moesslein

Geschäftsführer Polysecure GmbH
Engesserstr. 4a · D-79108 Freiburg
eMail: Jochen.Moesslein@polysecure.eu
Internet: <http://www.polysecure.eu>



Dr. rer. nat. Martin Fahr

CTO Polysecure, Polysecure GmbH
Engesserstr. 4a · D-79108 Freiburg
Tel. +49 761 5579 785 22, Fax: +49 761 5579 785 11
eMail: martin.fahr@polysecure.eu
Internet: <http://www.polysecure.eu>



Prof. Dr. Bryce Richards

Director Institute of Microstructure Technology (IMT)
Karlsruhe Institute of Technology (KIT) Campus Nord
Hermann-von-Helmholtz-Platz 1
D-76344 Eggenstein-Leopoldshafen
Tel. +49 721 608-26562
eMail bryce.richards@kit.edu
Internet: https://www.imt.kit.edu/1350_1487.php



Dr. Andrey Turshatov

Leiter der Arbeitsgruppe „Spectral Conversion for Photovoltaics“ · Institute of Microstructure Technology (IMT)
Karlsruhe Institute of Technology (KIT) Campus Nord
Hermann-von-Helmholtz-Platz 1
D-76344 Eggenstein-Leopoldshafen
Tel. +49 (0)721 608 28398
eMail: andrey.turshatov@kit.edu
Internet: https://www.imt.kit.edu/1401_125.php



Prof. Dr.-Ing. Claus Lang-Koetz

Nachhaltiges Technologie- und Innovationsmanagement
Institut für Industrial Ecology (INEC), Hochschule Pforzheim
Tiefenbronner Str. 65 · 75175 Pforzheim · Germany
Tel. 07231-28-6427 · Fax: 07231-28-7427
eMail: claus.lang-koetz@hs-pforzheim.de
Internet: <http://umwelt.hs-pforzheim.de>